



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY

Electroconductividad aparente del suelo como herramienta para identificar zonas con distinto grado de compactación

Luis Humberto Folgar Pérez

Magíster en Ciencias Agrarias opción Ciencias
del Suelo

Julio 2021

Tesis aprobada por el tribunal integrado por la Ing. Agr. (Ph.D) Florencia Alliaume, el Ing. Agr. (Ph.D) Oswaldo Ernst y el Ing. Agr. (Ph.D) José Terra el 19 de julio 2021. Autor: Ing. Agr. Humberto Folgar. Director Ing. Agr. (Ph.D) Mario Pérez Bidegain.

AGRADECIMIENTOS

Un agradecimiento muy especial al Ing. Agr. (Ph.D) Mario Pérez Bidegain por brindarme la posibilidad de realizar este trabajo de investigación, por ser la persona que me guió en todo este proceso, por su paciencia y colaboración.

A la Facultad de Agronomía por permitirme continuar con el proceso de formación académica.

A los compañeros Pilar Etchegoimberry, Ramiro Izaguirre y Juan Manuel Piaggio por su participación y colaboración con este trabajo.

A la Asociación Uruguaya Pro Siembra Directa (AUSID) y al Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA) que junto con la Facultad de Agronomía fueron las instituciones que formaron el FPTA 337, donde se enmarca este trabajo de investigación.

A mi familia y amigos, por acompañarme y apoyarme durante todo este proceso de formación.

TABLA DE CONTENIDO

PÁGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS	III
RESUMEN	VII
SUMMARY.....	VIII
1. <u>INTRODUCCIÓN</u>	1
1.1 OBJETIVOS	5
1.1.1 <u>Hipótesis general</u>	5
1.1.2. <u>Objetivo general</u>	5
1.1.3. <u>Hipótesis específicas</u>	5
1.1.4. <u>Objetivos específicos</u>	6
2. <u>LA ELECTROCONDUCTIVIDAD APARENTE DEL SUELO PARA IDENTIFICAR ZONAS DE CHACRAS CON DISTINTO GRADO DE COMPACTACIÓN</u>	8
2.1. RESUMEN	8
2.2. SUMMARY	9
2.3. INTRODUCCIÓN	10
2.4. MATERIALES Y MÉTODOS	11
2.4.1. <u>Sitio experimental y prácticas de manejo</u>	11
2.4.2. <u>Colección de datos y medidas</u>	13
2.4.3. <u>Análisis estadístico</u>	14
2.4.4. <u>Análisis geoestadístico</u>	14
2.4.5. <u>Delimitación de zonas</u>	15
2.5. RESULTADOS	16
2.5.1. <u>Electroconductividad aparente del suelo y estructura espacial</u>	16
2.5.2. <u>Correlación entre electroconductividad aparente y resistencia a la penetración</u>	18
2.5.3. <u>Correlación entre electroconductividad aparente y rendimiento de maíz</u>	19
2.5.4. <u>Correlación entre resistencia a la penetración y atributos de terreno</u>	20

2.5.5. <u>Zonas de manejo sitio-específico</u>	21
2.5.6. <u>Resistencia a la penetración y rendimiento de maíz en zonas de manejo sitio-específico</u>	23
2.6. DISCUSIÓN.....	24
2.6.1. <u>Resistencia a la penetración</u>	24
2.6.2. <u>Rendimiento de maíz</u>	26
2.7. CONCLUSIONES	27
2.8. AGRADECIMIENTOS.....	28
2.9. BIBLIOGRAFÍA	28
3. <u>EFFECTO DEL PARAPLOW SOBRE RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN DEL SUELO Y RENDIMIENTO DE MAÍZ</u>	33
3.1 RESUMEN.....	33
3.2 SUMMARY	34
3.3. INTRODUCCIÓN	35
3.4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	37
3.4.1. <u>Sitio experimental, tratamientos y prácticas de manejo</u>	37
3.4.2. <u>Colección de datos y medidas</u>	40
3.4.3. <u>Análisis estadístico</u>	41
3.5. RESULTADOS	42
3.5.1. <u>Resistencia a la penetración</u>	42
3.5.1.1. Análisis con remoción de la variabilidad espacial	42
3.5.1.2. Análisis con inclusión de la variabilidad espacial	44
3.5.2. <u>Rendimiento de maíz</u>	50
3.5.2.1 Análisis con remoción de la variabilidad espacial	50
3.5.2.2 Análisis con inclusión de la variabilidad espacial	50
3.6. DISCUSIÓN.....	52
3.6.1. <u>Resistencia a la penetración</u>	52
3.6.1.1. Análisis con remoción de la variabilidad espacial	52
3.6.1.2. Análisis con inclusión de variabilidad espacial	54
3.6.2. <u>Rendimiento de maíz</u>	55
3.6.2.1. Análisis con remoción de la variabilidad espacial	55
3.6.2.2. Análisis con inclusión de la variabilidad espacial	56

3.6.3 <u>Comparación de análisis estadísticos</u>	57
3.7. CONCLUSIONES	59
3.8. AGRADECIMIENTOS	59
3.9. BIBLIOGRAFÍA	60
4. <u>DISCUSIÓN GENERAL</u>	65
5. <u>CONCLUSIONES</u>	68
6. <u>BIBLIOGRAFÍA</u>	69

RESUMEN

En Uruguay se ha promovido el uso del paraplow a nivel productivo para mitigar aparentes problemas de compactación en suelos agrícolas. El objetivo de este trabajo fue evaluar la electroconductividad aparente del suelo (ECa) como herramienta para diferenciar zonas con distinto grado de compactación, y determinar el impacto de la descompactación subsuperficial con paraplow sobre la resistencia a la penetración del suelo (RP) y la respuesta en rendimiento del cultivo de maíz. El trabajo se desarrolló en dos chacras comerciales denominadas Atalaya y Expoactiva. El diseño experimental fue de fajas apareadas con tratamientos con paraplow y sin paraplow. El efecto del paraplow fue determinado transcurridos 12 meses, 18 meses y 36 meses desde su utilización. Se delimitaron zonas con los valores de ECa de las fajas sin paraplow en base a un análisis de clusters. Para determinar el efecto del paraplow se utilizaron dos estrategias de análisis estadísticos, una que remueve la variabilidad espacial y otra que la incluye mediante las zonas delimitadas por ECa. Se delimitaron 2 zonas de ECa en Atalaya (Alta y Baja) y 3 zonas de ECa en Expoactiva (Alta, Intermedia y Baja). Las zonas de Baja ECa registraron mayores valores de RP. El rendimiento de maíz no presentó diferencias estadísticamente significativas entre las distintas zonas de ECa ($P < 0,05$). El paraplow redujo la RP y tuvo una residualidad sobre esta de entre 18 y 36 meses dependiendo del sitio y zona de ECa evaluada. El análisis con remoción de la variabilidad espacial subestimó los valores de RP en zona de Baja ECa. El paraplow no generó respuesta en rendimiento de maíz, excepto en la zona de Baja ECa en Atalaya donde aumento el rendimiento 8% (640 kg/ha) transcurridos 12 meses desde su utilización. La ECa permitió delimitar zonas con altos valores de RP, que podrían utilizarse para el manejo sitio-específico de la compactación del suelo dirigiendo medidas de mitigación como el paraplow, que de acuerdo a estos resultados generarían una reducción de la RP sin asegurar la respuesta en rendimiento de maíz.

Palabras claves: compactación, resistencia a la penetración del suelo, paraplow, electroconductividad aparente del suelo, agricultura de precisión

APPARENT SOIL ELECTROCONDUCTIVITY AS A TOOL TO IDENTIFY ZONES WITH DIFERENT DEGREES OF COMPACTION

SUMMARY

In Uruguay, paraplow has been included in agricultural soils to alleviate apparent compaction problems. The objective of this work was to evaluate the apparent soil electroconductivity (ECa) as a tool to delineated zones with different degrees of compaction, and determine the impact of the subsoil loosening with paraplow in the soil penetration resistance (PR) and the response in corn yield. The work was developed in two commercial farms called Atalaya and Expoactiva. Treatments with paraplow or without paraplow were evaluated in a paired plot design. The effect of paraplow was determined 12 months, 18 months and 36 months after its use. The zones were delimited with de ECa values of the plots without paraplow based on a clusters analysis. Two statistical analyzes were used, one removed the spatial variability, and the other included its using zones delimited by ECa. Two zones were obtained in Atalaya (High and Low) and three in Expoactiva (High, Medium and Low). Low ECa zones had higher PR values. Corn yield was no statically significant for different zones ($P < 0.05$). The paraplow reduce PR and had a residual effect on it of between 18 and 36 months depending on the site and zones of ECa evaluated. The analysis with removal spatial variability underestimates the PR values in the Low ECa zones. Paraplow did not generate response in corn yield, except in the Low ECa zones in Atalaya where the yield increased 8% (640 kg/ha) 12 months after its use. The ECa made it possible to identify zones with high PR, which could be used in a site-specific management of soil compaction, carrying out mitigation measures such as paraplow, according to these results, paraplow would produce a reduction in PR without ensuring the response in corn yield.

Key words: compaction, soil penetration resistance, paraplow, apparent soil electroconductivity, precision farming

1. INTRODUCCIÓN

La compactación del suelo es un proceso por el cual las partículas del suelo son reorganizadas con una disminución del espacio vacío, provocando un contacto más cercano entre ellas (Soil Science Society of America, 1996). Este fenómeno es uno de los mayores problemas que enfrenta la agricultura moderna (Hamza y Anderson, 2005), porque genera cambios negativos en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo (Sudduth et al., 2010). Una de las principales causas de compactación es el tráfico de maquinaria pesada bajo condiciones inapropiadas de humedad del suelo (Horn et al., 1995, Spoor et al., 2003, Hamza y Anderson, 2008). También hay que agregar otros aspectos como la intensificación agrícola (Hamza y Anderson, 2008), y procesos naturales como periodos de humedecimiento y secado del suelo (Horn et al., 1995). Varios autores destacan la reducción del espacio poroso, la disminución del crecimiento radicular, la disminución de la capacidad de infiltración y del almacenaje de agua del suelo como las principales consecuencias de la compactación (Larson et al., 1994, Defosse y Richard, 2002, Hamza y Anderson, 2005, Al-Gaadi, 2012). Por lo tanto, estos efectos negativos sobre las propiedades del suelo pueden potencialmente reducir el crecimiento y la productividad de los cultivos (Al-Gaadi, 2012, Larson et al., 1994, Hamza y Anderson, 2005).

En el inicio de este siglo, la agricultura en Uruguay ha registrado cambios en el uso y manejo del suelo, destacándose en una primera instancia la adopción del sistema de siembra directa en sustitución del sistema de siembra con laboreo, seguida por la disminución del componente pasturas dentro de la rotación agrícola-ganadera, llegando a esquemas de agricultura continua (Ernst y Siri, 2011). Sumado a estos aspectos, se puede incluir el aumento del uso de maquinaria pesada de gran porte en la actividad agrícola. A nivel productivo existe la sospecha de posibles problemas de compactación, que requieren ser corregidos con el uso de subsoladores como el paraplow para mitigar sus efectos negativos sobre el crecimiento y rendimiento de los cultivos. En general, el uso de los subsoladores se realiza a escala de toda la chacra, previo al cultivo de maíz, buscando mitigar la susceptibilidad de este al estrés

hídrico durante su periodo crítico. Con la utilización del paraplow se busca aumentar la infiltración de agua y el almacenaje de agua en el suelo, así como disminuir su densidad aparente (West et al., 1996, Franzluebbbers et al., 2007, Hamza y Anderson, 2008). Estos aspectos mejorarían la exploración radicular generando una mayor captura de agua y nutrientes, aumentando el rendimiento de los cultivos (Braum et al., 1984, West et al., 1996). La utilización del paraplow en toda el área de chacra es habitual en muchos agricultores que consideran que el suelo es uniforme para su manejo, sin embargo, las propiedades del suelo son variables en tiempo y espacio (Machado et al., 2014). Por lo tanto, no se estaría teniendo en cuenta que la compactación puede variar entre campos, dentro del campo, y entre diferentes horizontes dentro del perfil del suelo (Koolen y Kuipers citados por Sudduth et al., 2010). Por este motivo, Sudduth et al. (2010) plantean abordar la compactación dentro de un marco de cuantificación sitio-específico, contemplando las variaciones horizontales y verticales de la compactación.

En este sentido, en la última década en Uruguay ha crecido la utilización de tecnología en el sector agrícola, por lo que enfoques de manejo de suelo uniforme han ido evolucionando hacia un manejo sitio-específico. Este cambio ha sido impulsado principalmente por el uso de sistemas de posicionamiento global (GPS), sistemas de información geográficos, imágenes satelitales, modelos digitales de terreno y por la utilización de cosechadoras equipadas con monitores de rendimiento. La utilización de este tipo de tecnologías se engloba dentro del concepto de agricultura de precisión, que se define como la aplicación de tecnologías para el manejo de la variabilidad espacial y temporal, asociada a todos los aspectos de la producción agrícola con el propósito de mejorar la productividad de los cultivos y la calidad ambiental (Pierce y Nowak, 1999). Varios autores remarcan que la electroconductividad aparente del suelo (ECa) se ha integrado dentro de la agricultura de precisión por brindar datos confiables, permitiendo coleccionar un largo volumen de datos de forma rápida y con relativa facilidad (Corwin y Lesch, 2003, Doolittle y Brevik, 2014, Lund et al., 1999, Sudduth et al., 2001, Kitchen et al., 2005, Machado et al., 2014). La ECa se puede definir como la capacidad del suelo de

conducir una corriente eléctrica (McNeill, 1992). Este flujo presenta tres posibles caminos: el primero es a través de la fase sólida, el segundo es a través de la fase líquida y el tercero es por la interface sólido-líquida (McNeill, 1992). Cuando nos enfocamos en la compactación del suelo, los cambios generados en el suelo afectan los 3 caminos del flujo de una corriente eléctrica. El aumento de la densidad aparente del suelo altera las propiedades eléctricas del mismo, debido a que el contacto entre las partículas del suelo aumenta, por lo tanto, estaría alterando el flujo de corriente eléctrica en la fase sólida y también en la interface sólido-líquida (Rhoades y Corwin, 1990). Otra consecuencia de este hecho es que altera el contenido de agua en el suelo, la disminución del mismo estaría afectando la fase líquida de conducción de la corriente eléctrica y también la interface sólido-líquida (Brevik y Fenton, 2004). Estos aspectos son los fundamentos por los que la ECa puede ser utilizada para determinar la compactación de suelo (Brevik y Fenton, 2004).

Diversos trabajos han establecido relaciones entre la resistencia a la penetración del suelo (RP) y la ECa permitiendo delinear zonas que presentan distinto grado de compactación (Brevik y Fenton, 2004, Hoefler et al., 2010, Sudduth et al., 2010, Peralta et al., 2013, Machado et al., 2014). En Uruguay, Coitiño et al. (2015) utilizó la ECa con el objetivo de cuantificar cambios temporales en el aporte de potasio desde el suelo y su respuesta en el cultivo de soja. La ausencia de trabajos que relacionen RP y ECa genera la interrogante de cómo será esta relación en los sistemas de agricultura continua bajo siembra directa de Uruguay. El conocimiento de la relación entre ambas variables podría proporcionar una herramienta de trabajo para identificar zonas con distintos niveles de compactación de suelo a nivel de chacra. Esto sería un aporte tecnológico para delinear zonas de manejo sitio-específico con altos valores de RP y planificar medidas de mitigación sobre las zonas que puedan afectar negativamente el crecimiento y rendimiento de los cultivos.

El paraplow es utilizado para aliviar posibles problemas de compactación. En este sentido, trabajos extranjeros muestran diferente efecto del paraplow sobre la RP y rendimiento de maíz, como también de la perdurabilidad de estos efectos (Chan et

al., 2006, Álvarez et al., 2009, Vallejos et al., 2014, Braim et al., 1984, Hamilton-Manns et al., 2002, Franzluebbbers et al., 2007, Busscher et al., 2002, Busscher y Bauer, 2003, Hamza y Anderson, 2008, West et al., 1996, Sadras et al., 2005). Estos trabajos han sido realizados en sistemas productivos que presentan algunas diferencias con los de Uruguay, como los tipos de suelo, rotación de cultivos, momento de utilización del paraplow, y características climáticas como el régimen de precipitaciones y temperaturas. A estos aspectos es importante sumarle que este trabajo fue desarrollado sobre chacras comerciales, de esta forma se contempla el manejo a escala comercial que difícilmente pueda ser incluido en ensayos a menor escala. Además, incluyen la heterogeneidad espacial del área de estudio, aspecto que caracteriza a los sistemas productivos de Uruguay. En Uruguay, existen como antecedentes 3 trabajos. El primero de Martino (1998), fue desarrollado con una rotación de cultivos que difiere a la utilizada en la última década, por la presencia del cultivo de girasol y una alta frecuencia de cereales de invierno. El incremento del rendimiento de maíz fue de 102% debido a una baja implantación de las parcelas testigos por la presencia de *Cynodon dactylon*. El segundo trabajo de Pravia (2009), fue realizado sobre sorgo integrado en tres rotaciones distintas; rotación de agricultura continua, rotación corta de 2 años de agricultura continua y 2 años de pradera corta, y una rotación larga de 2 años de agricultura continua y 4 años de pasturas. Solamente en uno de los ocho sitios de evaluación el paraplow generó un aumento de rendimiento, y también fue atribuido a su efecto sobre el control de *Cynodon dactylon*. El tercer trabajo de Ernst y Bentancur (2004), fue realizado en maíz, posterior a un verdeo de invierno pastoreado dentro de un sistema lechero. En este caso, el paraplow generó un aumento de rendimiento en un 23%.

Es necesario abordar los impactos generados por los cambios en los sistemas de agricultura bajo siembra directa que no rotan con pasturas y que presentan un predominio de los cultivos de verano. Además, el desarrollo de tecnologías asociadas a la producción agrícola permite cuantificar la variabilidad espacial a nivel de chacra, desarrollando un trabajo con un enfoque sitio-específico a través de la ECa. Estos aspectos permitirían determinar el efecto sitio-específico del paraplow dentro de las

diferentes zonas delimitadas en los sitios experimentales. Por un lado, se utilizará la ECa del suelo para delinear zonas de las chacras con diferente nivel de compactación y por otro se evaluará el efecto del paraplow como herramienta para minimizar sus efectos negativos sobre el crecimiento de los cultivos. También es importante agregar que en Uruguay durante los últimos 5 años distintas instituciones como Facultad de Agronomía (Udelar), Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA) y la Asociación Uruguaya Pro Siembra Directa (AUSID) a través de proyectos de investigación han generado conocimiento reciente sobre esta temática, estos trabajos han sido publicados como notas técnicas en revistas de difusión de la Facultad de Agronomía EEMAC-Cangüé (Etchegoimberry y Ernst, 2018), como series FPTA del INIA (Dabala et al., 2019), y también han formado parte de tesis de Grado de Facultad de Agronomía (Udelar).

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Hipótesis general

La electroconductividad aparente del suelo puede ser utilizada para identificar y delinear zonas con distinto grado de compactación dentro de unidades de manejo (chacras).

1.1.2. Objetivo general

Evaluar la electroconductividad aparente del suelo utilizando el sensor EM38 como una herramienta para diferenciar zonas de chacra con distinto grado de compactación.

1.1.3. Hipótesis específicas

- i) La electroconductividad aparente del suelo se correlaciona con la resistencia a la penetración del suelo y el rendimiento de grano de maíz.

- ii) El uso del paraplow disminuye la compactación del suelo (cuantificado mediante la resistencia a la penetración).
- iii) El uso del paraplow aumenta el rendimiento del cultivo de maíz.
- iv) El efecto del paraplow sobre la resistencia a la penetración del suelo y el rendimiento perdura por 3 años (duración del ensayo de descompactación mecánica).

1.1.4. Objetivos específicos

- i) Cuantificar la asociación entre la electroconductividad aparente del suelo, resistencia a la penetración del suelo y rendimiento de maíz.
- ii) Determinar el efecto del paraplow sobre la resistencia a la penetración del suelo.
- iii) Cuantificar la respuesta productiva del cultivo de maíz al uso del paraplow.
- iv) Evaluar la residualidad del paraplow sobre la resistencia a la penetración del suelo y el rendimiento de grano de maíz.

La estrategia planteada consistió en utilizar un sensor de ECa para delimitar zonas de manejo sitio-específico con distinto grado de compactación del suelo, y evaluar el efecto de la descompactación mecánica sobre la RP y el rendimiento de maíz en dos chacras comerciales de 8 y 8,5 ha respectivamente. Los tratamientos fueron realizados en fajas apareadas con paraplow y sin paraplow, ubicados en tres bloques que fueron instalados en otoño 2014, primavera 2015 y otoño 2016. Las determinaciones de campo fueron realizadas en el invierno de 2017, por lo tanto los tratamientos evaluados fueron de acuerdo al periodo de tiempo transcurrido entre el pasaje del paraplow y el momento de la determinación de su efecto (12 meses, 18 meses y 36 meses transcurridos desde su utilización). El trabajo final de tesis generó dos artículos científicos redactados de acuerdo a las normas de la revista Agrociencia Uruguay. El primero se centró en el objetivo general y en el primer objetivo específico, donde se planteó el uso de la ECa junto a otras metodologías de

agricultura de precisión para poder diseñar zonas con distinto grado de compactación. El segundo se basó en el efecto del paraplow sobre la RP y el rendimiento del cultivo de maíz, como también en la residualidad de estos efectos, incluyendo del segundo al cuarto objetivo específico. Para este trabajo fueron utilizadas las zonas de ECa determinadas en el primer artículo, como una metodología para captar la variabilidad espacial de las chacras. Dentro de cada una de estas zonas se analizó el efecto del paraplow sobre la RP y el rendimiento de maíz, como también la residualidad del paraplow sobre las dos variables mencionadas anteriormente.

2. LA ELECTROCONDUCTIVIDAD APARENTE DEL SUELO PARA IDENTIFICAR ZONAS DE CHACRAS CON DISTINTO GRADO DE COMPACTACIÓN

Folgar Humberto¹; Pérez Bidegain Mario¹.

¹ *Universidad de la República, Facultad de Agronomía, Departamento de Suelos y Aguas. Garzón 780, 12900 Montevideo, Uruguay. Correo electrónico: humberto.folgar90@gmail.com*

2.1. RESUMEN

El objetivo fue evaluar la electroconductividad aparente del suelo (ECa) con el sensor EM38 en el dipolo vertical (ECaV) y horizontal (ECaH) como una herramienta para diferenciar zonas con distinto grado de compactación, y su relación con la resistencia a la penetración del suelo (RP), los atributos de terreno y el rendimiento de maíz. Fueron evaluadas dos chacras comerciales Atalaya y Expoactiva. La relación entre las variables fue analizada mediante el coeficiente de correlación de Pearson. Se delimitaron zonas en base a un análisis de clusters con los valores de ECaV y ECaH. Se obtuvieron correlaciones significativas entre RP y ECaV, y entre RP y ECaH en el estrato de suelo de 20 a 40 cm con valores de $r = -0,44$ y $-0,71$. No existieron correlaciones entre ECa y rendimiento en la mayoría de los casos. Los atributos de terreno no fueron incluidos para delinear zonas por presentar bajas correlaciones con la RP. Se obtuvieron dos zonas de ECa en Atalaya (Alta y Baja) y tres en Expoactiva (Alta, Intermedia y Baja). Las zonas de Baja ECa presentaron los mayores valores de RP. No se observaron diferencias significativas en rendimiento entre zonas de ECa. La ECa permitió identificar zonas con altos valores de RP para el manejo sitio-específico de la mitigación de la compactación.

Palabras claves: compactación, resistencia a la penetración, electroconductividad aparente, agricultura de precisión

THE APPARENT SOIL ELECTROCONDUCTIVITY TO IDENTIFY ZONES OF FARMS WITH DIFFERENT DEGREE OF COMPACTION

2.2. SUMMARY

The objective of this work was to evaluate the apparent soil electroconductivity (ECa) with the EM38 sensor in the vertical dipole orientation (ECaV) and horizontal dipole orientation (ECaH) as a tool to delineated zones with different degrees of compaction, and determine the relationships with soil penetration resistance (PR), terrain attributes and corn yield. Two commercial farms Atalaya and Expoactiva were evaluated. The relationships between the variables were analyzed using the Pearson's correlation coefficient. Zones with ECaV and ECaH values were delimited based on a clusters analysis. Significant correlations between ECaV and PR and between ECaH and PR were obtained for 20 to 40 cm soil layer with values of $r = -0.44$ and -0.71 . The correlations between ECa and yield were not significant in most cases. Low correlations were obtained between PR and terrain attributes, this aspect caused that the terrain attributes were not included in the delimitation of zones. Two ECa zones were obtained in Atalaya (High and Low) and three in Expoactiva (High, Medium and Low). In Low ECa zones identified highest PR values. No significant differences in yield were observed between ECa zones. The ECa allowed the identification of zones with high PR values for site-specific management of compaction mitigation.

Key words: compaction, resistance to penetration, apparent electroconductivity, precision farming

2.3. INTRODUCCIÓN

La compactación del suelo es un proceso de reorganización de sus partículas, que ocasiona un contacto más cercano entre ellas⁽¹⁾. Una de las principales causas de la compactación del suelo es el tráfico de maquinaria pesada bajo condiciones inapropiadas de humedad del suelo⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾. También ocurre naturalmente por alternancia de periodos de humedecimiento y secado⁽²⁾⁽⁵⁾. Este proceso genera cambios en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo⁽⁶⁾, afectando negativamente la producción de los cultivos y el ambiente⁽⁷⁾. Una de las formas más comunes de evaluar la compactación es a través de la resistencia a la penetración del suelo (RP) mediante el índice de cono⁽⁸⁾. La variación de la RP puede ser utilizada para determinar zonas con distinto grado de compactación para el manejo sitio-específico del problema.

En este sentido, la agricultura de precisión implica el uso de tecnologías para la cuantificación y manejo de la variabilidad espacial y temporal, asociada a todos los aspectos de la producción agrícola con el propósito de mejorar la productividad de los cultivos y la calidad ambiental⁽⁹⁾. Entre estas destacan el uso de sistemas de posicionamiento global (GPS), imágenes aéreas, imágenes satelitales, modelos digitales de terreno y monitores de rendimiento. En este marco, la electroconductividad aparente del suelo (ECa) se ha utilizado frecuentemente para caracterizar la variabilidad espacial dentro del campo, permitiendo delinear zonas de manejo sitio-específicas⁽¹⁰⁾. Además, diversos autores destacan la inclusión de los atributos de terreno como una herramienta exitosa para analizar y predecir la distribución espacial de las propiedades del suelo⁽¹¹⁾⁽¹²⁾⁽¹³⁾.

La ECa se puede definir como la capacidad del suelo de conducir una corriente eléctrica⁽¹⁴⁾. Tiene 3 posibles caminos; el primero es a través de la fase sólida, el segundo es a través de la fase líquida, y el tercero es por la interface sólido-líquida⁽¹⁴⁾. La compactación del suelo altera el flujo de corriente en estos tres caminos⁽¹⁵⁾. Por esta razón, la ECa ha sido utilizada en varios trabajos para identificar

y caracterizar zonas con distintos niveles de compactación⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾. Los resultados muestran correlaciones significativas entre la ECa y la RP, y su utilidad para identificar patrones espaciales de compactación en los suelos⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾. En Uruguay son escasos los trabajos realizados con ECa, además no han sido con el objetivo de conocer la relación entre ECa y RP. Determinar la relación entre estas variables bajo las condiciones de los sistemas productivos de agricultura continua en siembra directa de Uruguay, permitiría identificar zonas con distintos niveles de RP. De esta manera, podrían utilizarse para dirigir medidas de manejo con el propósito de mitigar los problemas de compactación en las zonas afectadas. En este sentido, las hipótesis planteadas son: i) la ECa puede ser utilizada para identificar zonas con distinto grado de compactación, ii) la ECa se correlaciona con la RP y el rendimiento de maíz, iii) la inclusión de atributos de terreno permitirán delimitar con mayor precisión zonas con distinto grado de compactación.

El objetivo general fue evaluar la ECa como una herramienta para delinear zonas con distinto grado de compactación. También se establecieron los siguientes objetivos específicos: i) determinar la relación entre la ECa y la RP, ii) determinar la relación entre la ECa y el rendimiento de maíz, y iii) determinar la relación entre la RP y los atributos de terreno.

2.4. MATERIALES Y MÉTODOS

2.4.1. Sitio experimental y prácticas de manejo

La investigación se realizó en dos chacras comerciales denominadas Atalaya (33°25'19,80'' S; 57°58'54,56'' O) y Expoactiva (33°26'51,09'' S; 57°54'14,19'' O), en el departamento de Soriano, Uruguay. Ambos sitios se ubicaron sobre la Unidad de Suelo Cuchilla de Corralito, sobre un Brunosol Subéutrico Lúvico como suelo dominante según la Carta de Reconocimiento de Suelos del Uruguay⁽¹⁹⁾. El sistema productivo fue manejado en agricultura continua en siembra directa.

Las precipitaciones durante el periodo de cultivo (diciembre-mayo) alcanzaron los 688 mm⁽²⁰⁾, superando en 235 mm a la serie histórica 1980-2009 (Figura 1).

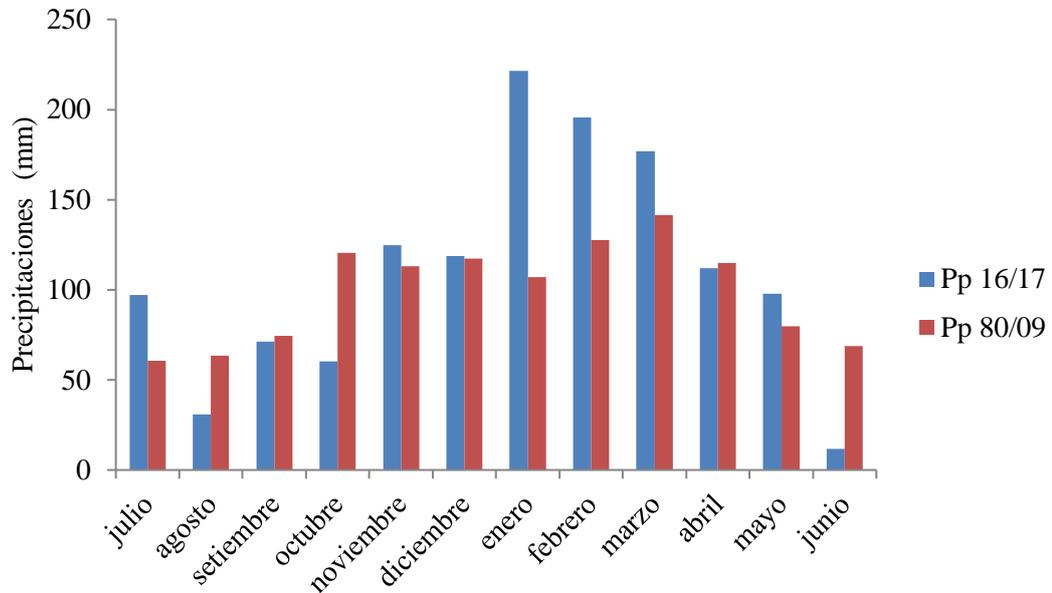


Figura 1. Precipitaciones acumuladas mensualmente desde julio 2016 hasta junio 2017 (Pp 16/17) y promedio histórico de precipitaciones mensuales 1980-2009 (Pp 80/90) en la zona de influencia de los sitios experimentales.

El área de estudio comprendió 8,5 ha en el predio Atalaya y 8 ha en Expoactiva. Ambos sitios son parte de un ensayo de descompactación mecánica, en los que se evaluó el efecto del subsolado del suelo con un paraplow. Este ensayo presentó un diseño experimental de fajas apareadas con tratamientos con paraplow y sin paraplow. En este trabajo se utilizaron sólo los tratamientos sin descompactar para no incluir el efecto del paraplow en las variables relevadas. Las unidades experimentales fueron 9 fajas de 290 m de largo y 32 m de ancho en Atalaya, y en Expoactiva fueron 8 fajas: 6 de 270 m de largo, una de 160 m de largo y por último una de 55 m de largo, todas presentaron un ancho de 32 m. La diferencia en el largo de las fajas en Expoactiva se debió a que no se contaba con más área de chacra.

El cultivo de maíz fue sembrado el 30 de noviembre de 2016 en Atalaya y en Expoactiva el 21 de diciembre de 2016. En ambos sitios el manejo del cultivo fue realizado con las prácticas y recomendaciones generales a escala comercial.

2.4.2. Colección de datos y medidas

En los dos sitios se utilizó un muestro sistemático en grilla rectangular, en Atalaya cada faja contaba con 14 sitios de muestreo a una distancia promedio de 20 m, en Expoactiva 6 fajas presentaron 13 sitios de muestreo, una presentó 9 sitios de muestreo y la última 4 sitios de muestreo. Las 8 fajas presentaron una distancia promedio entre sitios de muestreo de 18 m. El total de sitios de muestreo fue de 126 en Atalaya y 94 en Expoactiva, todos pertenecientes a las fajas sin paraplow. En cada sitio de muestreo se realizaron determinaciones de ECa, RP y rendimiento de maíz.

La ECa fue determinada con un electroconductímetro EM38 en julio de 2017 en Atalaya y en agosto de 2017 en Expoactiva. El EM38 opera a una profundidad de 1,5 m en el dipolo vertical (ECaV) y 0,75 m en el dipolo horizontal (ECaH)⁽¹⁷⁾. El electroconductímetro fue colocado sobre la superficie del suelo en el dipolo vertical y horizontal de manera perpendicular a la línea de siembra del cultivo de maíz, realizando una medición en la fila y otra en la entrefila, utilizando el valor promedio de fila y entrefila para ECaV y ECaH en cada sitio de muestreo.

La RP fue determinada mediante el índice de cono en julio de 2017 en Atalaya y en agosto de 2017 en Expoactiva, utilizando un penetrómetro Rimik CP 20⁽²¹⁾. Se realizó una determinación en la fila de siembra y otra en la entrefila, utilizando el valor promedio de ambas determinaciones en cada sitio de muestreo. Se registraron valores de RP cada 2 cm hasta 40 cm de profundidad de suelo. Estos valores fueron agrupados en 4 estratos con intervalos de 10 cm, obteniendo un valor promedio de RP para cada uno de los intervalos generados en cada sitio de muestreo. Todas las determinaciones de ECa y RP se realizaron con el suelo próximo a capacidad de campo.

El rendimiento de maíz fue determinado en junio de 2017. En Atalaya se utilizó una cosechadora equipada con monitor de rendimiento. La cosechadora recorrió el centro de cada unidad experimental registrando valores de rendimiento de maíz con intervalos de 1,5 m aproximadamente. Se agruparon los rendimientos en celdas de 20 m de largo obteniéndose el valor promedio en cada sitio de muestreo. En Expoactiva se cosechó manualmente un área de 5 m² alrededor de cada sitio de muestreo. En cada área se contabilizó el número de plantas, y se cosecharon manualmente las espigas para la determinación del número y peso de granos en el laboratorio.

Mediante DGPS se obtuvieron datos de elevación de terreno en ambos sitios. Se realizó en agosto de 2017 con un equipo Trimble R3 ubicando una base de GPS a una altura conocida, y con un vehículo se llevó otro GPS que registró elevaciones con intervalos de 15 m. A partir de estos datos se realizó un modelo digital de terreno, mediante este modelo se calcularon atributos primarios y secundarios. Los atributos primarios fueron: pendiente, aspecto, curvatura del perfil, curvatura de plano, y área específica de cuenca. Los atributos secundarios fueron: índice topográfico de humedad (TWI), índice de poder de escorrentía (SPI) e índice de capacidad de transporte de sedimentos (LS). Para el procesamiento de datos se utilizaron los algoritmos indicados por Moore et al.⁽²²⁾ mediante el software SAGA GIS versión 2.1.4⁽²³⁾.

2.4.3. Análisis estadístico

Mediante el coeficiente de correlación de Pearson se analizaron las relaciones entre ECa y RP, ECa y rendimiento de maíz, y entre RP y los atributos de terreno de los sitios de muestreo de las fajas sin paraplow.

2.4.4. Análisis geoestadístico

Se realizaron interpolaciones con el objetivo de generar mapas de ECaV, ECaH y el modelo digital de terreno, siguiendo los pasos indicados por Webster y Oliver⁽²⁴⁾. Se

realizó el cálculo de semivarianzas y variograma empírico con distintos ajustes de modelos de semivariogramas, el criterio de selección utilizado fue el de menor suma de cuadrados del error. A partir del modelo seleccionado se realizó la interpolación denominada Kriging Ordinario. Se utilizó el software R versión 3.4.1⁽²⁵⁾.

Se clasificó la estructura espacial de las variables ECaV y ECaH de acuerdo con el criterio propuesto por Cambardella et al.⁽²⁶⁾. Estos autores definen la estructura espacial como la relación entre la semivarianza nugget y la semivarianza total. A través de esta relación definen tres clases de dependencia espacial, si la proporción es igual o menor a 25% se considera que la variable posee una fuerte dependencia espacial, si la relación se encuentra entre 25% y 75% se considera que la variable posee una moderada dependencia espacial, y por último si la relación supera el 75% se considera que la variable posee una débil dependencia espacial.

2.4.5. Delimitación de zonas

La delimitación de zonas se realizó con la información de las variables que presentaron correlaciones con RP. En este sentido, solamente fueron utilizados los valores de ECaV y ECaH de los sitios de muestreo georeferenciados pertenecientes a los tratamientos sin paraplow, mediante un procedimiento de medias c-difusas a través de una clasificación continua no supervisada con el software Management Zone Analyst (MZA)⁽²⁷⁾. El número óptimo de zonas a formar se define mediante 2 indicadores, FPI (índice de desempeño difuso) y NCI (clasificación de entropía normalizada), cuando estos dos indicadores adquieren sus mínimos valores se obtiene el número óptimo de zonas a formar. El análisis entre zonas se realizó mediante un modelo mixto, donde las zonas generadas se consideraron como efectos fijos y los puntos de muestreo de cada zona como una observación repetida. Se utilizó el software R versión 3.4.1⁽²⁵⁾ con un nivel de significancia de $p < 0,05$.

2.5. RESULTADOS

2.5.1. Electroconductividad aparente del suelo y estructura espacial

En Atalaya el ajuste de semivariograma fue esférico para ECaV y ECaH. Los valores de ECaV presentaron un máximo de $79 \text{ mS}\cdot\text{m}^{-1}$ y un mínimo de $24 \text{ mS}\cdot\text{m}^{-1}$ (Figura 2a), para ECaH el valor máximo alcanzó los $72 \text{ mS}\cdot\text{m}^{-1}$ y el mínimo $26 \text{ mS}\cdot\text{m}^{-1}$ (Figura 2b). En Expoactiva el ajuste de semivariograma fue esférico para ECaV y lineal para ECaH. El valor máximo de ECaV fue $84 \text{ mS}\cdot\text{m}^{-1}$ y el mínimo $45 \text{ mS}\cdot\text{m}^{-1}$ (Figura 2c), en relación a ECaH el máximo fue $71 \text{ mS}\cdot\text{m}^{-1}$ y el mínimo $43 \text{ mS}\cdot\text{m}^{-1}$ (Figura 2d).

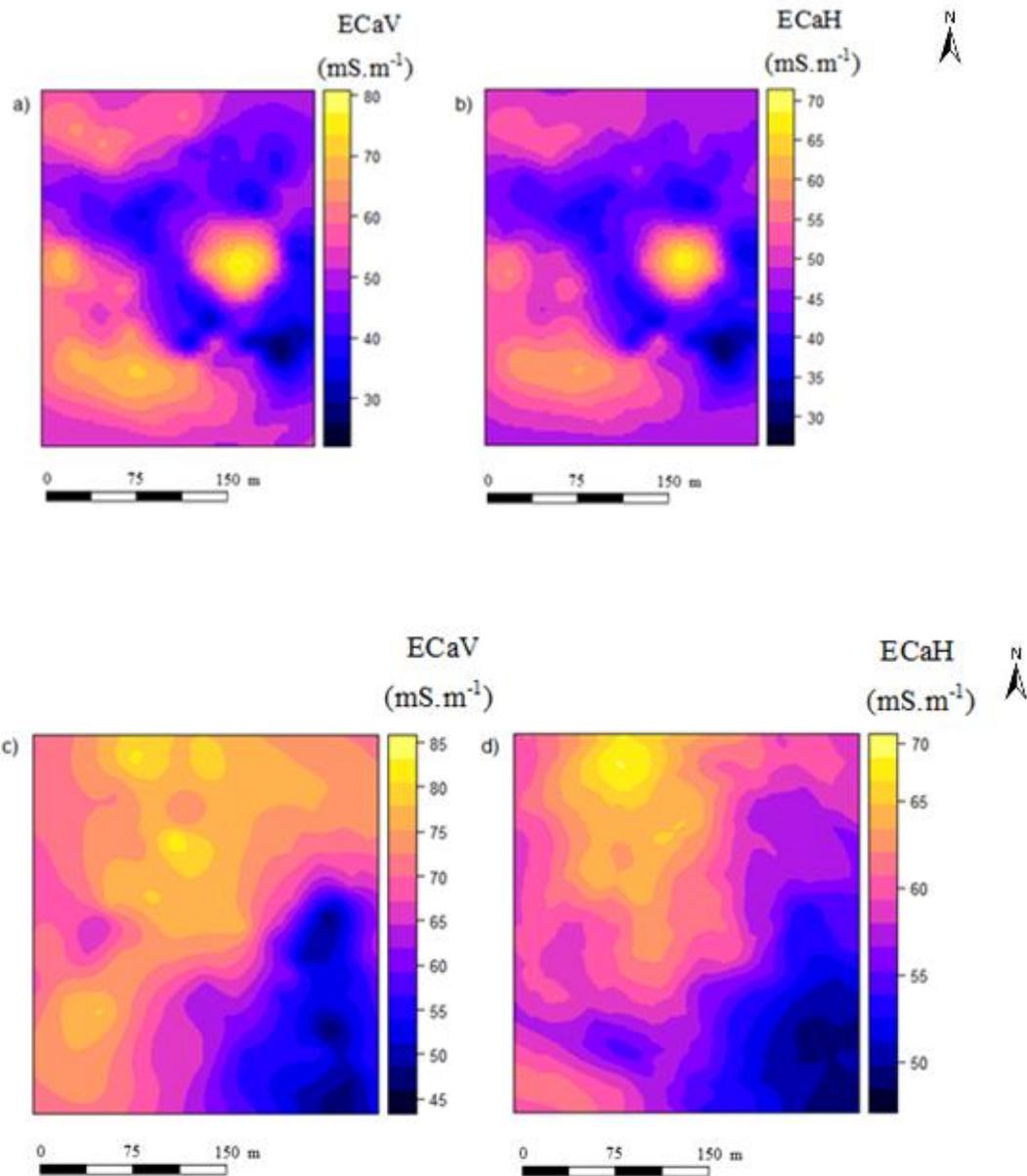


Figura 2. Interpolación Kriging Ordinario para electroconductividad aparente del suelo ($\text{mS}\cdot\text{m}^{-1}$) en el dipolo vertical (ECaV) y horizontal (ECaH), en los sitios experimentales Atalaya y Expoactiva. a) ECaV Atalaya, b) ECaH Atalaya, c) ECaV Expoactiva, d) ECaH Expoactiva.

En Atalaya la dependencia espacial de ECaV y ECaH se situó dentro de la clase de fuerte dependencia espacial. En Expoactiva ECaV presentó fuerte dependencia espacial y ECaH moderada dependencia espacial (Cuadro 1).

Cuadro 1. Parámetros de los modelos de semivariogramas para electroconductividad aparente del suelo ($\text{mS}\cdot\text{m}^{-1}$) en el dipolo vertical (ECaV) y horizontal (ECaH), en los sitios experimentales Atalaya y Expoactiva.

Atalaya								
ECa	N	Modelo	Rango (m)	Nugget	Parcial Sill	EE (%)	SSE	MSE
ECaV	126	Esférico	107	7,08	132,55	5,34	41,21	49,95
ECaH	126	Esférico	99	7,64	61,65	12,39	14,66	29,22
Expoactiva								
ECa	N	Modelo	Rango (m)	Nugget	Parcial Sill	EE (%)	SSE	MSE
ECaV	94	Esférico	159	1,05	58,1	1,81	6,54	10,76
ECaH	94	Lineal	142	8,88	17,1	51,93	1,43	13,75

EE: Estructura espacial: $(\text{nugget/sill})\cdot 100$.

SSE: Suma de cuadrado del error en semivariograma

MSE: Cuadrado medio del error de residuales en validación cruzada

2.5.2. Correlación entre electroconductividad aparente y resistencia a la penetración

En Atalaya se encontraron correlaciones significativas entre ECaV, ECaH y RP en el estrato de 20-40 cm de suelo ($P < 0,05$) (Cuadro 2). Mientras que en Expoactiva las correlaciones entre ECaV, ECaH y RP fueron significativas en el estrato de 10-40 cm de suelo ($P < 0,05$) (Cuadro 2). En ambos sitios las correlaciones fueron negativas, aumentando su valor a mayor profundidad de suelo (Cuadro 2).

Cuadro 2. Coeficiente de correlación de Pearson entre electroconductividad aparente del suelo ($\text{mS}\cdot\text{m}^{-1}$) en el dipolo vertical (ECaV), horizontal (ECaH) y resistencia a la penetración del suelo (kPa), en los sitios experimentales Atalaya y Expoactiva.

ECa	RP	Atalaya		Expoactiva	
		Pearson	p-valor	Pearson	p-valor
ECaV	RP 0-10	-0,04	0,6819	-0,15	0,1453
ECaV	RP 10-20	-0,10	0,2466	-0,41	<0,0001
ECaV	RP 20-30	-0,41	<0,0001	-0,59	<0,0001
ECaV	RP 30-40	-0,64	<0,0001	-0,71	<0,0001
ECaH	RP 0-10	-0,02	0,7999	-0,01	0,9005
ECaH	RP 10-20	-0,08	0,3770	-0,24	0,0183
ECaH	RP 20-30	-0,44	<0,0001	-0,43	<0,0001
ECaH	RP 30-40	-0,63	<0,0001	-0,52	<0,0001

2.5.3. Correlación entre electroconductividad aparente y rendimiento de maíz

En general no se encontraron correlaciones significativas entre ECaV, ECaH y rendimiento de maíz en ambos sitios, excepto entre ECaH y rendimiento en Atalaya donde fue muy baja ($P<0,05$) (Cuadro 3).

Cuadro 3. Coeficiente de correlación de Pearson entre electroconductividad aparente del suelo ($\text{mS}\cdot\text{m}^{-1}$) en el dipolo vertical (ECaV), horizontal (ECaH) y rendimiento de maíz (kg/ha), en los sitios experimentales Atalaya y Expoactiva.

Variables	Atalaya		Expoactiva	
	Pearson	p-valor	Pearson	p-valor
ECaV-Rendimiento	-0,17	0,0609	0,09	0,3796
ECaH-Rendimiento	-0,18	0,0496	0,07	0,5152

2.5.4. Correlación entre resistencia a la penetración y atributos de terreno

En Atalaya solamente se encontraron correlaciones significativas para TWI con RP en los estratos de suelo de 0-10 cm y de 30-40 cm (Cuadro 4). En los restantes atributos de terreno no se obtuvieron correlaciones estadísticamente significativas ($P < 0,05$).

Cuadro 4. Coeficiente de correlación de Pearson entre resistencia a la penetración del suelo (kPa) y atributo de terreno, en el sitio experimental Atalaya.

RP	Atributo de terreno	Pearson	p-valor
RP 0-10	TWI	-0,21	0,0168
RP 30-40	TWI	-0,25	0,0048

TWI: Índice topográfico de humedad.

En Expoactiva se registraron correlaciones significativas entre elevación, área específica de cuenca, SPI, TWI y RP desde 0-40 cm de suelo. En aspecto solamente se encontró correlación significativa con RP en el estrato de suelo de 0-10 cm. En LS la correlación fue estadísticamente significativa con RP en el estrato de suelo de 30-40 cm. En los restantes atributos de terreno no se encontraron diferencias estadísticamente significativas ($P < 0,05$) (Cuadro 5).

Cuadro 5. Coeficiente de correlación de Pearson entre resistencia a la penetración del suelo (kPa) y atributos de terreno, en el sitio experimental Expoactiva.

RP	Atributos de terreno	Pearson	p-valor
RP 0-10	Elevación	0,46	<0,0001
RP 0-10	Área específica de cuenca	-0,33	0,0011
RP 0-10	Aspecto en grados	-0,39	0,0001
RP 0-10	SPI	-0,29	0,0040
RP 0-10	TWI	-0,35	0,0006
RP 10-20	Elevación	0,45	<0,0001
RP 10-20	Área específica de cuenca	-0,30	0,0037
RP 10-20	SPI	-0,22	0,0352
RP 10-20	TWI	-0,36	0,0004
RP 20-30	Elevación	0,45	<0,0001
RP 20-30	Área específica de cuenca	-0,34	0,0008
RP 20-30	SPI	-0,26	0,0120
RP 20-30	TWI	-0,39	0,0001
RP 30-40	Elevación	0,61	<0,0001
RP 30-40	Área específica de cuenca	-0,45	<0,0001
RP 30-40	LS	-0,21	0,0461
RP 30-40	SPI	-0,37	0,0002
RP 30-40	TWI	-0,49	<0,0001

SPI: Índice de poder de escorrentía.

TWI: Índice topográfico de humedad.

LS: Índice de capacidad de transporte de sedimentos.

2.5.5. Zonas de manejo sitio-específico

En Atalaya se generaron 2 zonas de ECa que se denominaron Alta y Baja (Figura 3a), y en Expoactiva se generaron 3 zonas denominadas Alta, Intermedia y Baja (Figura 3b). La denominación de estas zonas fue de acuerdo con los valores de ECaV y ECaH registrados dentro de cada una. Los atributos de terreno no fueron incluidos

en la delimitación de zonas, ya que su utilización provocaba un deterioro de los indicadores NCI y FPI.

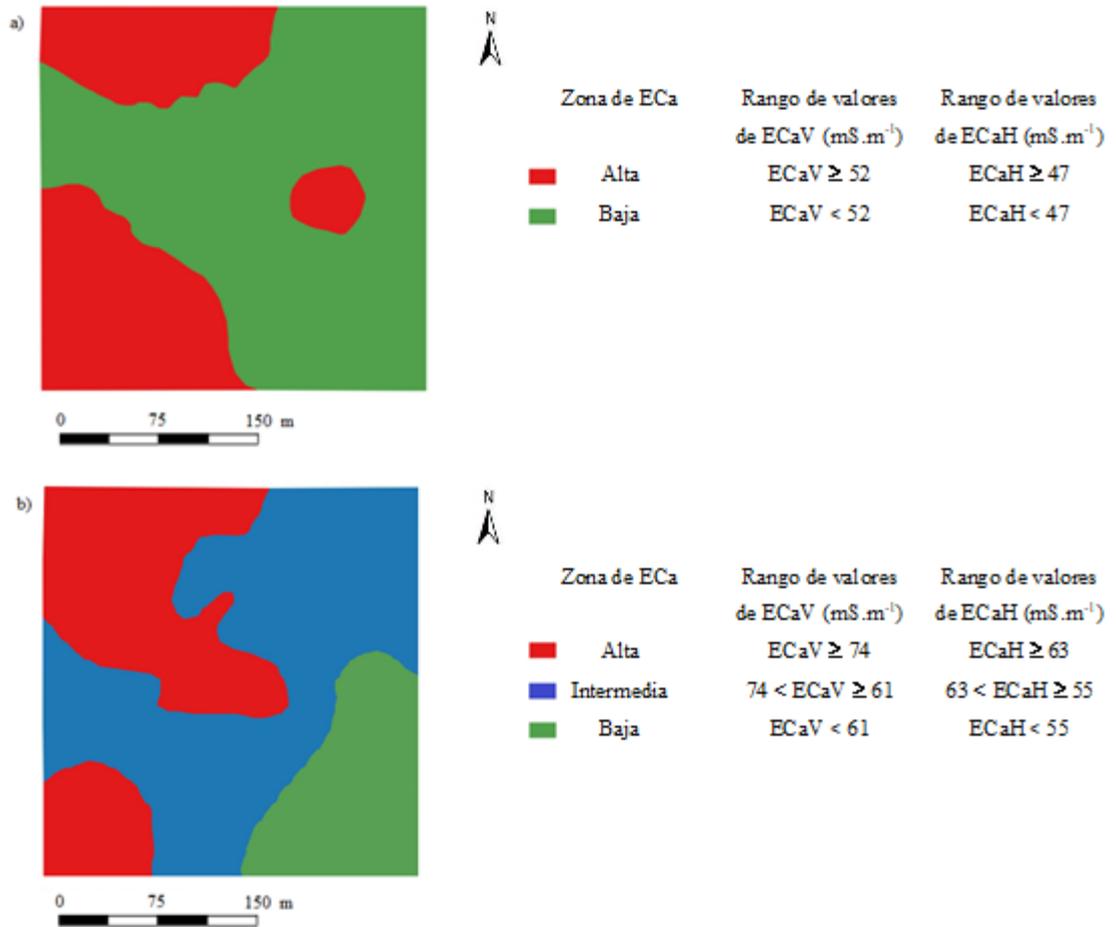


Figura 3. Delimitación de zonas de manejo sitio-específico mediante el procedimiento de medias c-difusas utilizando la electroconductividad aparente del suelo ($\text{mS}\cdot\text{m}^{-1}$) en el dipolo vertical (ECaV) y horizontal (ECaH). a) Sitio experimental Atalaya, b) Sitio experimental Expoactiva.

2.5.6. Resistencia a la penetración y rendimiento de maíz en zonas de manejo sitio-específico

En Atalaya la RP presentó diferencias estadísticamente significativas en el estrato de suelo de 30 a 40 cm, el valor de RP fue 15% superior en la zona de Baja ECa con respecto a la zona de Alta ECa. El rendimiento de maíz no presentó diferencias estadísticamente significativas entre zonas de ECa ($P < 0,05$) (Cuadro 6).

Cuadro 6. Resistencia a la penetración del suelo (kPa) y rendimiento de maíz (kg/ha) en zonas definidas por electroconductividad aparente del suelo ($mS \cdot m^{-1}$) en el sitio experimental Atalaya.

Variables*	Zona de Alta ECa	Zona de Baja ECa	p-valor
RP 0-10	853 a	841 a	0,8462
RP 10-20	1512 a	1517 a	0,9136
RP 20-30	1621 a	1693 a	0,0711
RP 30-40	1761 b	2032 a	<,0001
Rendimiento	8703 a	8852 a	0,7319

*Letras distintas en la misma fila indican diferencias significativas ($P < 0,05$).

En Expoactiva la RP presentó diferencias estadísticamente significativas entre las zonas de Alta e Intermedia ECa con respecto a la zona de Baja ECa desde los 10 cm hasta los 40 cm de suelo. La zona de Baja ECa registró mayores valores de RP, superando en 33% y 34% a los de la zona de Alta e Intermedia ECa. El rendimiento de maíz no presentó diferencias estadísticamente significativas entre zonas de ECa ($P < 0,05$) (Cuadro 7).

Cuadro 7. Resistencia a la penetración del suelo (kPa) y rendimiento de maíz (kg/ha) en zonas definidas por electroconductividad aparente del suelo en el sitio experimental Expoactiva.

Variables*	Zona de Alta	Zona de	Zona de Baja	p-valor
	E _{Ca}	Intermedia E _{Ca}	E _{Ca}	
RP 0-10	823 a	807 a	831 a	0,0624
RP 10-20	1213 b	1183 b	1363 a	0,0023
RP 20-30	1370 b	1364 b	1774 a	<,0001
RP 30-40	1497 b	1547 b	2316 a	<,0001
Rendimiento	8862 a	8589 a	7822 a	0,066

*Letras distintas en la misma fila indican diferencias significativas (P<0,05).

2.6. DISCUSIÓN

2.6.1. Resistencia a la penetración

La E_{Ca} captó la heterogeneidad espacial de las chacras, permitiendo realizar los semivariogramas (Cuadro 1) y la interpolación de datos para realizar mapas de E_{CaV} y E_{CaH} (Figura 2), que mostraron similares patrones espaciales de E_{CaV} y E_{CaH} dentro de cada sitio experimental. Este hecho puede ser explicado por características inherentes a los suelo de las áreas estudiadas⁽²⁸⁾⁽²⁹⁾. En este sentido, Cambardella et al.⁽²⁶⁾ agrega que variables con fuerte dependencia espacial como las reportadas en este estudio están asociadas a variaciones intrínsecas de las propiedades del suelo, como la textura y mineralogía. La variabilidad espacial captada por la E_{CaV} y E_{CaH} fue el aspecto que permitió delinear zonas de manejo sitio-específico (Figura 3). La inclusión de los atributos de terreno no generó un mejor desempeño de los indicadores FPI y NCI. Por lo tanto, dentro de cada zona habría más heterogeneidad, este hecho puede estar explicado por la baja correlación que presentaron los atributos de terreno con la RP en ambos sitios (Cuadro 4 y 5).

Las correlaciones entre RP y ECa fueron negativas, indicando que mayores valores de ECa se asocian a menores valores de RP (Cuadro 2), similar a lo reportado por Sudduth et al.⁽¹⁷⁾ y Machado et al.⁽¹⁸⁾. Machado et al.⁽¹⁸⁾ reportan correlaciones de -0,36 y -0,7 entre ECaV y RP y de -0,44 y -0,53 entre ECaH y RP, en profundidades de suelo de 0 a 40 cm. Por otro lado, Sudduth et al.⁽¹⁷⁾ encontraron correlaciones entre -0,38 hasta -0,63 en las profundidades de suelo de 5 a 55 cm, solamente trabajaron con el EM38 en el dipolo vertical. La relación entre RP y ECa se explica por los cambios que genera la compactación del suelo en la densidad aparente y en la capacidad de almacenaje de agua en el suelo, siendo aspectos que afectan tanto a las mediciones de RP y como las de ECa⁽¹⁵⁾.

Las zonas delimitadas por ECa presentaron diferencias significativas en RP, identificando a las zonas de Alta ECa con menores valores de RP y las zonas de Baja ECa con mayores valores de RP (Cuadro 6 y 7), aspecto que coincide con lo reportado por Sudduth et al.⁽¹⁷⁾ y Machado et al.⁽¹⁸⁾. En este sentido, Sudduth et al.⁽¹⁷⁾ explica este comportamiento a partir de cambios encontrados en la textura del suelo dentro del área experimental, indicando que zonas de Alta ECa presentaron mayor contenido de arcilla y mayor contenido de agua en el suelo. Además, en ambos sitios experimentales, la zona de Baja ECa superó el valor crítico de 2000 kPa propuesto como restrictivo para el crecimiento radicular⁽³⁰⁾ en el estrato de suelo de 30 a 40 cm. Estos resultados concuerdan con los de Hoefler et al.⁽¹⁶⁾, Sudduth et al.⁽¹⁷⁾ y Machado et al.⁽¹⁸⁾ que afirman que la ECa puede ser un indicador útil para delimitar zonas compactadas. Además, Sudduth et al.⁽¹⁷⁾ y Machado et al.⁽¹⁸⁾ agregan que localizar áreas que puedan exhibir altos valores de RP generaría una caracterización de la RP más eficiente dentro del campo, debido a que podrían realizarse muestreos de RP dirigidos por zonas delimitadas mediante ECa.

En este sentido, Fox et al.⁽³¹⁾ realizaron una caracterización de la compactación del suelo en base al valor crítico de RP de 2000 kPa, con el objetivo de realizar un manejo sitio-específico del subsolado del suelo. Sus resultados muestran que el 52% del área no necesitó subsolado, repercutiendo en una reducción de 45% del

combustible utilizado por el hecho de determinar la RP inicial en el área de chacra. En este estudio, la caracterización de la RP basada en ECa indica que el área que superó los 2000 kPa fue de 63% en Atalaya y 19% en Expoactiva. Este aspecto demuestra la importancia de una caracterización de la RP de la chacra, permitiendo realizar un manejo sitio-específico de la RP enfocados en las zonas de Baja ECa. Machado et al.⁽¹⁸⁾ agrega que la utilización de ECa para captar la variabilidad espacial de las propiedades de suelo no sustituye las determinaciones de RP, ya que es necesario conocer cuál es el valor de RP dentro de cada zona de ECa.

2.6.2. Rendimiento de maíz

Las correlaciones entre ECa y rendimiento no fueron significativas en la mayoría de los casos. Solo en el sitio Atalaya se encontró alguna correlación de rendimiento con ECaH (Cuadro 3), aunque la misma fue baja y negativa en comparación a la reportada por Kitchen et al.⁽³²⁾. Esto puede ser explicado por las complejas interacciones suelo-planta-ambiente junto con medidas de manejo que determinan el rendimiento de los cultivos⁽³²⁾⁽³³⁾. Kitchen et al.⁽³²⁾ reportaron correlaciones negativas entre -0,13 y -0,67 trabajando con maíz en 4 sitios experimentales durante 5 años. Stadler et al.⁽³³⁾ en trigo, cebada y remolacha azucarera en una evaluación de 5 sitios experimentales durante 3 años encontraron correlaciones entre 0,18 y 0,35. Con sus resultados concluyeron que las correlaciones obtenidas en sus trabajos son inconsistentes entre años y sitios experimentales, destacando la necesidad de incluir mayor información como fertilidad del suelo, implantación de cultivos e información relacionada a plagas, malezas y enfermedades.

Con relación al rendimiento obtenido en zonas definidas por ECa, era esperable encontrar mayor rendimiento de maíz en zonas de Alta e Intermedia ECa por presentar menores valores de RP en comparación a la zona de Baja ECa (Cuadro 6 y 7). Este aspecto favorecería la exploración radicular y por lo tanto la captura de agua y nutrientes. Además, la RP en las zonas de Alta e Intermedia ECa no superó el valor crítico propuesto como restrictivo para el crecimiento radicular⁽³⁰⁾. En este sentido,

Hamza y Anderson⁽⁵⁾ reportan el rango de RP de 1500 a 1800 kPa, como un rango a partir del cual comienza a manifestarse problemas en el crecimiento radicular. Este valor es ampliamente superado en zona de Baja ECa y son los rangos de valores alcanzados en las zonas de Intermedia y Alta ECa. Sudduth et al.⁽¹⁷⁾ y Machado et al.⁽¹⁸⁾ afirman que en suelos sin salinidad las zonas de Alta ECa presentan mayor contenido de arcilla y mayor retención de agua en el suelo, este es otro aspecto que indicaría un mayor potencial de rendimiento en zonas de Alta e Intermedia ECa. En este sentido, Stadler et al.⁽³³⁾ encontraron coincidencia entre las zonas con bajos valores de ECa, y zonas con bajos rendimiento. Este hecho puede ser visualizado en Expoactiva donde las zonas de Alta e Intermedia ECa presentaron mayores rendimientos, superando en 13% y 10% a los de la zona de Baja ECa ($P=0,07$) (Cuadro 7). Otro aspecto destacado por Stadler et al.⁽³³⁾ es el régimen de precipitaciones durante el periodo de cultivo, ya que la relación entre la zona de Baja ECa y bajo rendimiento puede identificarse en situaciones con déficit hídrico moderado. En este sentido, las precipitaciones registradas en el periodo de cultivo superaron en 235 mm a la serie histórica 1980-2009 (Figura 1), siendo probablemente el aspecto que impidió observar distintos rendimientos de maíz en las zonas delimitadas por ECa.

2.7. CONCLUSIONES

La ECa representó la variabilidad espacial de la RP a nivel de chacra, permitiendo delinear zonas de manejo sitio-específicas. Los atributos de terreno no presentaron correlaciones significativas con la RP en la mayoría de los casos evaluados, excluyéndolos de la metodología utilizada para delimitar zonas.

Los valores de ECa se correlacionaron negativamente con los de RP entre 20-40 cm en Atalaya y entre 10-40 cm en Expoactiva. En zonas de Baja ECa para el estrato de suelo de 30-40 cm los valores de RP superaron el umbral crítico (2000 kPa) restrictivo para el crecimiento radicular.

El rendimiento de maíz no se correlacionó con la ECa. No se detectó diferencia en el rendimiento de maíz entre zonas delimitadas por ECa. Este hecho puede ser explicado por las buenas condiciones hídricas en el periodo de cultivo.

Estos resultados sugieren que la realización de zonas en base a ECa representan patrones espaciales de RP, que pueden ser utilizados para dirigir medidas de manejo enfocadas a mitigar la compactación de suelo.

2.8. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Facultad de Agronomía, INIA y AUSID, por la financiación de las actividades a través del Proyecto de Promoción y Tecnología Agropecuaria 337.

2.9. BIBLIOGRAFÍA

1. Soil Science Society of America. Glossary of Soil Science Terms. Madison: Soil Science Society of America, Inc; 1996. p. 134.
2. Horn R, Domzal H, Slowinska-Jurkiewicz A, Van Ouwerkerk C. Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils and the environment. *Soil Tillage Res.* 1995;35(1-2):23-36.
3. Spoor G, Tijink FGJ, Weiskopf P. Subsoil compaction: risk, avoidance, identification and alleviation. *Soil Tillage Res.* 2003;73(1-2):175-82.
4. Hamza MA, Anderson WK. Combinations of ripping depth and tine spacing for compacted sandy and clayey soils. *Soil Tillage Res.* 2008;99(2):213-20.
5. Hamza MA, Anderson WK. Soil compaction in cropping systems a review of the nature, causes and possible solutions. *Soil Tillage Res.* 2005;82(2):121-45.

6. Gupta SC, Sharma PP, DeFranchi SA. Compaction effects on soil structure. En: Brady NC, editor. *Advances in Agronomy*, volume 42. San Diego: Academic Press, Inc; 1989. p. 311-38.
7. Larson WE, Eynard A, Hadas A, Lipiec, J. Control and avoidance of soil compaction in practice. En: Soane BD, van Ouwerkerk C, editores. *Soil Compaction in Crop Production*. Amsterdam: Elsevier Science B.V; 1994. p. 597-625.
8. González Barrios P, Pérez Bidegain M, Gutiérrez L. Effects of tillage intensities on spatial soil variability and site-specific management in early growth of *Eucalyptus grandis*. *For Ecol Manage*. 2015;346:41-50.
9. Pierce F, Nowak P. Aspects of precision agriculture. En: Sparks DL, editor. *Advance in Agronomy 67*. San Diego: Academic Press; 1999. p. 1-85.
10. Corwin DL, Lesch SM. Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture. *Comput Electron Agric*. 2005;46:11-43.
11. Gessler PE, Moore ID, McKenzie NJ, Ryan PJ. Soil-landscape modeling and spatial prediction of soil attributes. *Int J Geogr Inf Syst*. 1995;9(4):421-32.
12. Gessler PE, Chadwick OA, Chamran F, Althouse L, Holmes K. Modeling soil-landscape and ecosystem properties using terrain attributes. *Soil Sci Soc Am J*. 2000;64(6):2046-56.
13. Thompson JA, Pena-Yewtukhiw EM, Grove JH. Soil-landscape modeling across a physiographic region: Topographic patterns and model transportability. *Geoderma*. 2006;133(1-2):57-70.
14. McNeill JD. Rapid, accurate mapping of soil salinity by electromagnetic ground conductivity meters. En: Topp GC, Reynolds WD, Green RE, editores. *Advances in*

measurement of soil physical properties: Bringing theory into practice. Madison: Soil Science Society of America, Inc; 1992. p. 209-29.

15. Brevik EC, Fenton TE. The effect of changes in bulk density on soil electrical conductivity as measured with the Geonics® EM-38. *Soil Horizons*. 2004;45(3):96-102.

16. Hoefler G, Bachmann J, Hartge KH. Can the EM38 probe detect spatial patterns of subsoil compaction?. En: Viscarra RA, McBratney AB, Minasny B, editores. *Proximal Soil Sensing*. Dordrecht: Springer Science+Business Media B.V; 2010. p. 265-73.

17. Sudduth KA, Kitchen NR, Chung S, Drummond ST. Site-specific compaction, soil physical property, and crop yield relationships for claypan soils. En: ASABE Meeting Presentation Paper Number: 1009432, editor. American Society of Agricultural and Biological Engineers Annual International Meeting; 2010 Junio 20-23; Pittsburg. Michigan: American Society of Agricultural and Biological Engineers; 2010. p. 1-17.

18. Machado G, Dafonte J, Bueno J, Valcárcel M, Farías E. Using soil apparent electrical conductivity to optimize sampling of soil penetration resistance and to improve the estimations of spatial patterns of soil compaction. *Sci World J*. 2014;2014:1-12.

19. Altamirano A, Da Silva H, Durán A, Echeverría A, Panario D, Puentes R. Descripciones, datos físicos y químicos de los suelos dominantes. En: Altamirano A, Da Silva H, Durán A, Echeverría A, Panario D, Puentes R, editores. *Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay*. Montevideo: MAP; 1976. p. 85-8.

20. Inumet. Boletín pluviométrico. [Internet]. 2020. [citado 15 de mayo 2020]. Disponible desde: <https://www.inumet.gub.uy/clima/recursos-hidricos/boletin-pluviometrico>.
21. Rimik CP 20. Rimik CP 20 Cone penetrometer hardware instruction manual. [Internet]. 2000. [citado 15 de mayo 2020];1-22. Disponible desde: <https://www.rimik.com/PDF%20file/CP20%20Manual.pdf>.
22. Moore ID, Gessler PE, Nielsen GA, Peterson GA. Soil Attribute Prediction using Terrain Analysis. *Soil Sci Soc Am J.* 1993;57(2):443-452.
23. Conrad O, Bechtel B, Bock M, Dietrich H, Fischer E, Gerlitz L, Wehberg J, Wichmann V, Boehner J. System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4. *Geosci Model Dev.* 2015;8(7):1991-2007.
24. Webster R, Oliver MA. *Geostatistics for Environmental Scientists*. Chichester: Wiley; 2007. p. 332.
25. R Core Team. R: A language and environment for statistical computing [Internet]. Vienna: R Foundation for Statistical Computing; 2017 [citado 15 de mayo 2020]. Disponible desde: <https://www.R-project.org/>.
26. Cambardella CA, Moorman TB, Novak JM, Parkin TB, Karlen DL, Turco RF, Konopka AE. Field-Scale Variability of Soil Properties in Central Iowa Soils. *Soil Sci Soc Am J.* 1994;58(5):1501-11.
27. Fridgen JJ, Kitchen NR, Sudduth KA, Drummond ST, Wiebold WJ, Fraisse CW. Management Zone Analyst (MZA): Software for subfield management zone delineation. *Agron J.* 2004;96:100-8.

28. Sudduth KA, Drummond ST, Kitchen NR. Accuracy issues in electromagnetic induction sensing of soil electrical conductivity for precision agriculture. *Comput Electron Agric.* 2001;31(3):239-64.
29. Sudduth, KA, Kitchen NR, Bollero GA, Bullock DG, Wiebold WJ. Comparison of electromagnetic induction and direct sensing of soil electrical conductivity. *Agron J.* 2003;95(3):472-82.
30. Taylor HM, Gardner HR. Penetration of cotton seedling taproots as influenced by bulk density, moisture content, and strength of the soil. *Soil Sci.* 1963;96(3):153-56.
31. Fox JW, Khalilian A, Han YJ, Williams PB, Nafchi AM, Maja JM, Marshall MW, Barnes EM. Real-Time, Variable-Depth Tillage for Managing Soil Compaction in Cotton Production. *Open J Soil Sci.* 2018;8(6):147-61.
32. Kitchen NR, Sudduth KA, Drummond ST. Soil electrical conductivity as a crop productivity measure for claypan soils. *J Prod Agric.* 1999;12(4):607-17.
33. Stadler A, Rudolph S, Kupisch M, Langensiepen M, van der Kruk J, Ewert F. Quantifying the effects of soil variability on crop growth using apparent soil electrical conductivity measurements. *Eur J Agron.* 2015;64:8-20.

3. EFECTO DEL PARAPLOW SOBRE RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN DEL SUELO Y RENDIMIENTO DE MAÍZ

Folgar Humberto¹; Pérez Bidegain Mario¹.

¹ *Universidad de la República, Facultad de Agronomía, Departamento de Suelos y Aguas. Garzón 780, 12900 Montevideo, Uruguay. Correo electrónico: humberto.folgar90@gmail.com*

3.1 RESUMEN

El objetivo fue determinar el impacto espacial y temporal del paraplow sobre la resistencia a la penetración del suelo (RP), rendimiento de maíz, y evaluar su residualidad. El trabajo fue desarrollado en dos sitios (Atalaya y Expoactiva). Se determinó la electroconductividad aparente del suelo (ECa), RP y rendimiento de maíz. Los tratamientos evaluados fueron descompactados con paraplow y testigo sin paraplow en un diseño de fajas apareadas. El efecto del paraplow fue determinado transcurridos 12 meses, 18 meses y 36 meses desde su utilización. Se realizaron dos análisis estadísticos, uno removi6 la variabilidad espacial, y el otro la incluy6 utilizando zonas delimitadas por ECa mediante un análisis de clusters. Se obtuvieron dos zonas de ECa en Atalaya (Alta y Baja) y tres en Expoactiva (Alta, Intermedia y Baja). En los dos análisis estadísticos el paraplow redujo la RP. Considerando la variabilidad espacial la residualidad de la RP fue de 36 meses, excepto en las zonas de Intermedia y Baja ECa en Expoactiva que alcanzaron los 18 meses. No se registr6 respuesta en rendimiento de maíz, excepto en la zona de Baja ECa en Atalaya, fue de 8% en la evaluación realizada a 12 meses de su utilización. El paraplow como medida de mitigación de la compactación del suelo mostr6 un efecto positivo sobre la RP sin asegurar aumento del rendimiento.

Palabras claves: compactación, resistencia a la penetración, paraplow, electroconductividad aparente

EFFECT OF PARAPLOW IN THE SOIL PENENTRATION RESISTANCE AND CORN YIELD

3.2 SUMMARY

The objective was to determine the spatial and temporal impact of the paraplow in the soil penetration resistance (PR), corn yield, and evaluate the residual effect. The work was developed in two sites (Atalaya and Expoactiva). The apparent soil electroconductivity (ECa), PR, and corn yield were determined. Treatments with paraplow and control without paraplow were evaluated in a paired plot design. The effect of paraplow was determined 12 months, 18 months and 36 months after its use. Two statistical analyzes were performed, one removed the spatial variability, and the other included its using zones delimited by ECa through a clusters analysis. Two zones were obtained in Atalaya (High and Low) and three in Expoactiva (High, Medium and Low). In both statistical analyzes, the paraplow reduced PR. Considering the spatial variability, the residual effect of PR was 36 months, except in the Medium and Low ECa zones in Expoactiva, which reached 18 months. No responses was registered in corn yield, except in the Low ECa zone in Atalaya, it was 8% in the evaluation carried out 12 months after its use. Paraplow as an alternative to mitigate soil compaction, showed a positive effect in PR without ensuring an increase in yield.

Keywords: compaction, penetration resistance, paraplow, apparent electroconductivity

3.3. INTRODUCCIÓN

La compactación del suelo es un proceso de reorganización de sus partículas, que ocasiona un contacto más cercano entre ellas⁽¹⁾. El tráfico de maquinaria es una de sus principales causas, y su magnitud depende del tipo de suelo y su contenido de agua, así como del peso del vehículo, la velocidad de avance, la presión de contacto entre el neumático y el suelo, y el número de pasadas⁽²⁾. Además, naturalmente ocurre por alternancia de periodos de humedecimiento y secado⁽³⁾⁽⁴⁾. Cuando el suelo es compactado disminuye la aireación, infiltración y capacidad de almacenaje de agua, repercutiendo negativamente en el desarrollo radicular y eventualmente en el crecimiento y rendimiento de los cultivos⁽²⁾.

En las primeras dos décadas del siglo XXI se ha dado un proceso de intensificación agrícola en Uruguay, caracterizado por la reducción de las pasturas en la rotación agrícola-ganadera y su sustitución parcial o total por cultivos anuales⁽⁵⁾. Otro cambio importante fue la creciente adopción del sistema de siembra directa en sustitución del sistema de siembra con laboreo⁽⁵⁾. Estos cambios han sido acompañados por un incremento en el uso de maquinaria pesada en las actividades de siembra, cosecha y protección de cultivo. Durante este periodo, se ha observado una tendencia negativa en los rendimientos de los cultivos luego de varios años de agricultura continua con siembra directa⁽⁶⁾. Esta situación plantea la interrogante sobre la magnitud de los problemas de compactación de suelos en los sistemas agrícolas, así como las posibles medidas de manejo preventivo y/o paliativo de la misma. Una de las herramientas mecánicas para mitigar posible efectos de la compactación de suelos sobre la productividad de los cultivos es el uso del paraplow⁽⁴⁾. Esta herramienta se utiliza generalmente previo a la siembra del cultivo de maíz sin determinar el estado de compactación inicial en el área de chacra.

El paraplow es una herramienta que posee timones con un espaciamiento de 50 cm, cada timón tiene un vástago de acero que penetra perpendicularmente la superficie del suelo con una inclinación de un ángulo de 45 grados, la profundidad de trabajo

puede alcanzar hasta los 40 cm⁽⁷⁾. La inclinación de los timones produce el levantamiento del suelo a medida que el paraplow avanza, ocasionando la fractura del suelo por sus planos de debilidad natural⁽⁸⁾⁽⁹⁾.

El uso del paraplow previo a la siembra del cultivo de maíz se fundamenta en trabajos que muestran efectos positivos del subsolado en el desarrollo radicular de los cultivos, como resultado de la reducción de la densidad aparente y de la RP, sumado a la mejora de la infiltración y de la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo⁽⁷⁾⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾⁽¹²⁾⁽¹³⁾. También diversos autores plantean distinta residualidad de los efectos del paraplow sobre características del suelo como RP y densidad aparente. Franzluebbers et al.⁽¹¹⁾ y Álvarez et al.⁽¹³⁾ indicaron que el efecto del paraplow perduró sobre la densidad aparente y RP solamente por 12 meses, en cambio Hamilton-Manns et al.⁽¹⁰⁾ y Hamza y Anderson⁽¹²⁾ encontraron efecto del paraplow sobre la densidad aparente y RP posterior a los 15 y 24 meses, respectivamente.

El cultivo de maíz posee una alta sensibilidad al déficit hídrico en su periodo crítico, ubicado en momentos de alta demanda atmosférica, por lo tanto, en Uruguay la disponibilidad hídrica es la principal causa que limita su rendimiento. En este sentido, problemas de compactación de suelo repercuten negativamente en el desarrollo radicular, y por lo tanto en la extracción de agua y nutrientes. No siempre se observan aumentos de rendimiento de maíz en respuesta al uso del paraplow, debido a que la misma depende de las condiciones del suelo durante su uso y a las condiciones climáticas durante el ciclo del cultivo⁽⁷⁾. Las hipótesis planteadas en este trabajo son: i) El uso del paraplow permite disminuir la compactación del suelo (cuantificado mediante la resistencia a la penetración). ii) El uso del paraplow aumenta el rendimiento del cultivo de maíz. iii) El efecto del paraplow sobre la resistencia a la penetración y el rendimiento perdura al menos por 3 años (duración del ensayo de descompactación).

El objetivo general fue cuantificar la respuesta y residualidad del paraplow sobre la resistencia a la penetración del suelo y el rendimiento de maíz.

3.4. MATERIALES Y MÉTODOS

3.4.1. Sitio experimental, tratamientos y prácticas de manejo

La investigación se realizó en dos sitios de agricultura continua en siembra directa denominados como Atalaya (33°25'19,80'' S; 57°58'54,56'' O) y Expoactiva (33°26'51,09'' S; 57°54'14,19'' O), ubicados en Soriano, Uruguay. Ambos sitios se ubicaron sobre la Unidad de Suelo Cuchilla de Corralito, sobre un Brunosol Subéutrico Lúvico como suelo dominante según la Carta de Reconocimiento de Suelos del Uruguay⁽¹⁴⁾. El área de estudio comprendió 8,5 ha en el predio Atalaya y 8 ha en Expoactiva.

Las precipitaciones durante el periodo de cultivo (diciembre-mayo) alcanzaron los 688 mm⁽¹⁵⁾, superando en 235 mm a la serie histórica 1980-2009 (Figura 1).

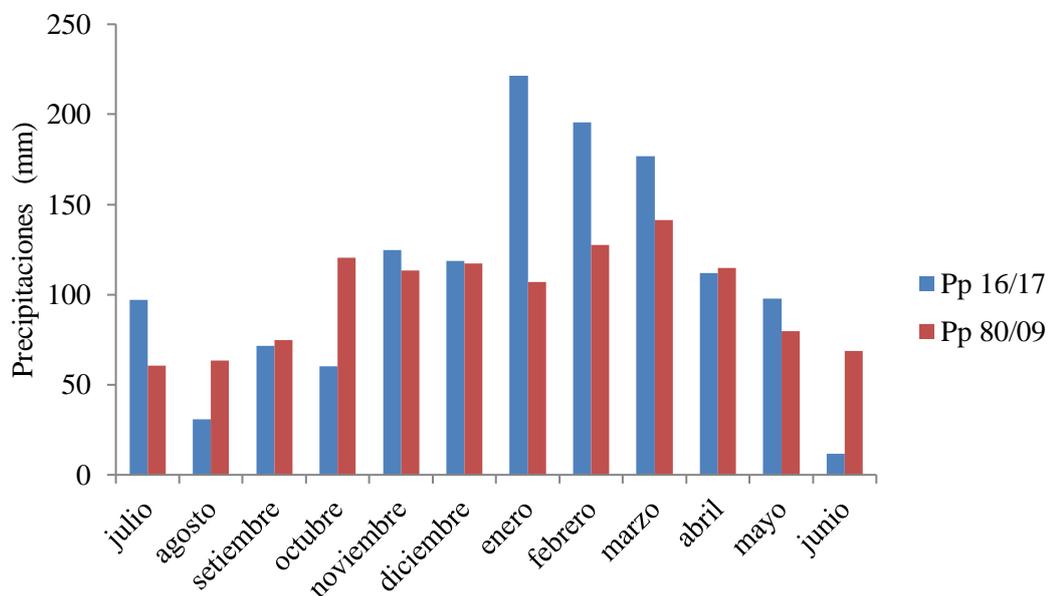


Figura 1. Precipitaciones acumuladas mensualmente desde julio 2016 hasta junio 2017 (Pp 16/17) y promedio histórico de precipitaciones mensuales 1980-2009 (Pp 80/90) en la zona de influencia de los sitios experimentales.

Los tratamientos evaluados fueron descompactados con paraplow y testigo sin paraplow. La descompactación fue realizada con un paraplow Dolbi, con 8 púas, ubicadas a una distancia de 0,5 m, alcanzando una profundidad de trabajo de 0,4 m, en 3 años consecutivos: otoño 2014, primavera 2015 y otoño 2016. En cada uno de estos años fue instalado un bloque de tratamientos con paraplow y sin paraplow en un diseño experimental de fajas apareadas con 3 repeticiones, excepto en el bloque del año 2016 en Expoactiva que presentó 2 repeticiones de tratamientos (Figura 2). En Atalaya las unidades experimentales fueron fajas de 290 m de largo y 16 m de ancho, y en Expoactiva fueron fajas de 270 m de largo y 16 m de ancho en los bloques instalados en 2014 y 2015. El bloque instalado en 2016 presentó 4 fajas apareadas, 2 de 160 m de largo y 2 de 55 m de largo, todas con un ancho de 16 m. La diferencia en el largo de las fajas en Expoactiva se debió a que no se contaba con más área de chacra.

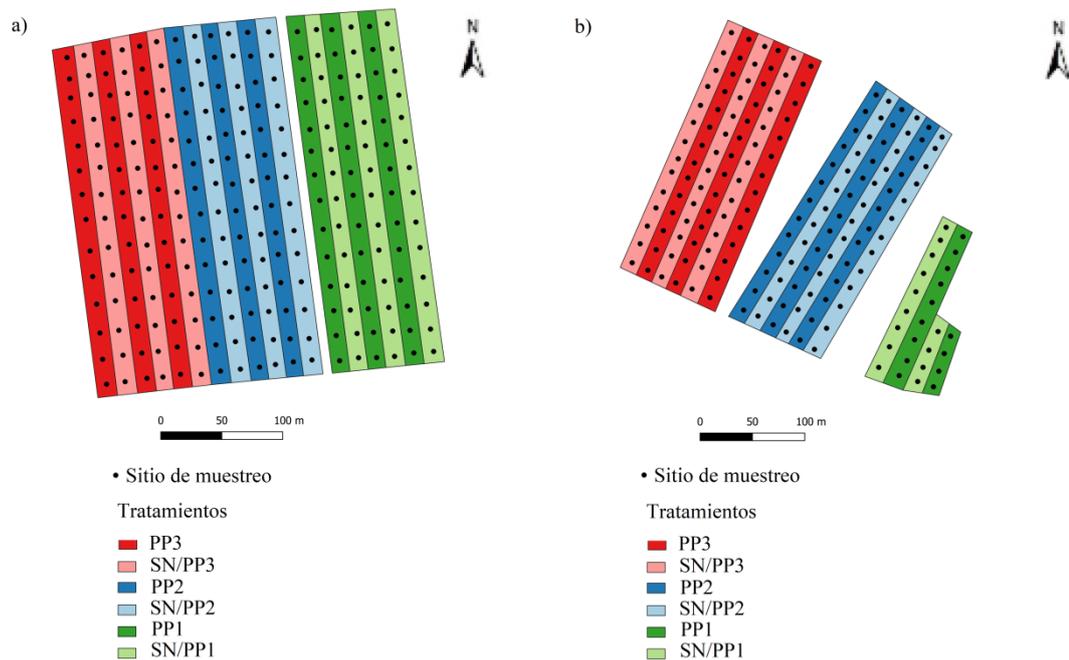


Figura 2. Diseño experimental, tratamientos y sitios de muestreo. a) Atalaya, b) Expoactiva. PP3: tratamiento con paraplow transcurridos 36 meses desde su utilización. SN/PP3: tratamiento sin paraplow apareado al tratamiento que determina el efecto del paraplow transcurridos 36 meses desde su utilización. PP2: tratamiento con paraplow transcurridos 18 meses desde su utilización. SN/PP2: tratamiento sin paraplow apareado al tratamiento que determina el efecto del paraplow transcurridos 18 meses desde su utilización. PP1: tratamiento con paraplow transcurridos 12 meses desde su utilización. SN/PP1: tratamiento sin paraplow apareado al tratamiento que determina el efecto del paraplow transcurridos 12 meses desde su utilización.

El efecto del paraplow sobre el rendimiento de maíz, RP y electroconductividad aparente del suelo (ECa) fue evaluado en el invierno del año 2017. En junio se realizaron las determinaciones de rendimiento. En julio y agosto las determinaciones de ECa y RP en Atalaya y Expoactiva, respectivamente. Por lo tanto, los tratamientos fueron denominados de acuerdo con el tiempo transcurrido desde la utilización del paraplow hasta el momento de la determinación de su efecto. De esta manera, se identifican 6 tratamientos: paraplow 3 (PP3) y sin paraplow 3 (SN/PP3) que corresponden al bloque instalado en el año 2014 con 36 meses transcurridos desde la

utilización del paraplow y la determinación de su efecto, paraplow 2 (PP2) y sin paraplow 2 (SN/PP2) que corresponden al bloque instalado en el año 2015 con 18 meses transcurridos desde la utilización del paraplow y la determinación de su efecto, paraplow 1 (PP1) y sin paraplow 1 (SN/PP1) que corresponden al bloque instalado en el año 2016 con 12 meses transcurridos desde la utilización del paraplow y la determinación de su efecto (Figura 2).

El cultivo de maíz fue sembrado el 30 de noviembre de 2016 en Atalaya y en Expoactiva el 21 de diciembre de 2016. En ambos sitios el manejo del cultivo fue realizado con las prácticas y recomendaciones generales a escala comercial.

3.4.2. Colección de datos y medidas

En los dos sitios se utilizó un muestro sistemático en grilla rectangular. En Atalaya se muestrearon 18 fajas, cada una contenía 14 sitios de muestreo a una distancia promedio de 20 m (Figura 2a). En Expoactiva se muestrearon 16 fajas: 12 de ellas con 13 sitios de muestreo, 2 con 9 sitios de muestreo y 2 más con 4 sitios de muestreo (Figura 2b). Las 16 fajas presentaron una distancia promedio entre sitios de muestreo de 18 m. En total se relevaron 252 y 188 sitios de muestreo en Atalaya y Expoactiva, respectivamente.

La ECa fue usada para captar la variabilidad espacial de la chacra, de esta forma se pueden realizar zonas de manejo sitio-específicas y analizar el efecto del paraplow dentro de cada una de las zonas. La ECa fue obtenida con un electroconductímetro EM38, en el dipolo vertical (ECaV) y horizontal (ECaH). Este sensor de inducción electromagnética opera a profundidades de 1,5 m en el dipolo vertical y 0,75 m en el dipolo horizontal⁽¹⁶⁾. El electroconductímetro fue colocado sobre la superficie del suelo de manera perpendicular a las líneas de siembra del cultivo de maíz. Se determinó la ECaV y ECaH en la fila de siembra y en la entrefila, utilizando el valor promedio de las determinaciones de fila y entrefila de ECaV y ECaH en cada sitio de

muestreo correspondiente a las fajas sin paraplow. Al momento de la determinación de ECa el contenido de agua del suelo se encontraba próximo a capacidad de campo.

La RP fue determinada mediante el índice de cono, utilizando un penetrómetro Rimik CP 20⁽¹⁷⁾. Se registraron valores de RP con intervalos de 2 cm hasta una profundidad de suelo de 40 cm. Se realizó una determinación en la fila de siembra y otra en la entrefila, utilizando el valor promedio de ambas determinaciones en cada sitio de muestreo. Al momento de la determinación de RP el contenido de agua del suelo se encontraba próximo a capacidad de campo.

El rendimiento en Atalaya fue determinado con una cosechadora equipada con monitor de rendimiento. La cosechadora recorrió el centro de cada unidad experimental registrando valores de rendimiento de maíz con intervalos de 1,5 m aproximadamente. Se agruparon los rendimientos en celdas de 20 m de largo obteniéndose el valor promedio para cada sitio de muestreo. En Expoactiva se cosechó manualmente un área de 5 m² alrededor de cada sitio de muestreo. En cada área se contabilizó el número de plantas, y se cosecharon manualmente las espigas para la determinación del número y peso de granos en el laboratorio.

3.4.3. Análisis estadístico

Para evaluar el efecto del paraplow sobre la RP y el rendimiento de maíz se utilizaron dos enfoques estadísticos. El primero se basó en la corrección de la variabilidad espacial para excluirla de las medias de los tratamientos. El segundo enfoque incluyó la variabilidad espacial mediante un modelo mixto.

El primero de ellos se describió como método ISA (Interactive Spatial Analysis) y fue propuesto por Zas⁽¹⁸⁾. Es una modelación con técnicas geoestadísticas basadas en la realización de un kriging interactivo para remover correlaciones espaciales.

El segundo fue mediante la delimitación de zonas de ECa por medio de un procedimiento de medias c-difusas, a través de una clasificación continua no supervisada con el software Management Zone Analyst (MZA)⁽¹⁹⁾, con los valores de ECaV y ECaH de los sitios de muestreo correspondiente a los tratamientos sin paraplow. Dentro de cada zona se analizó el efecto de los tratamientos sobre la RP y el rendimiento de maíz mediante un modelo mixto que consideró a los tratamientos como efectos fijos y a los puntos de muestreo de cada zona como observaciones repetidas. Se utilizó el software R versión 3.4.1⁽²⁰⁾ con un nivel de significancia de $p < 0,05$.

3.5. RESULTADOS

3.5.1. Resistencia a la penetración

3.5.1.1. Análisis con remoción de la variabilidad espacial

En Atalaya el paraplow redujo la RP con respecto a los tratamientos sin paraplow en todos los momentos (Figura 3). La mayor reducción relativa de la RP fue de 25% transcurridos 12 meses desde la utilización del paraplow en el estrato de suelo de 6 a 28 cm ($P < 0,05$) (Figura 3c). Mientras tanto, la reducción relativa de la RP fue de 17% y 16% transcurridos 18 meses (6 a 26 cm) y 36 meses (8 a 34 cm) desde la utilización del paraplow, respectivamente ($P < 0,05$) (Figura 3b y 3a). El efecto residual del paraplow sobre la RP perduró durante 36 meses en el estrato de suelo de 8 a 26 cm.

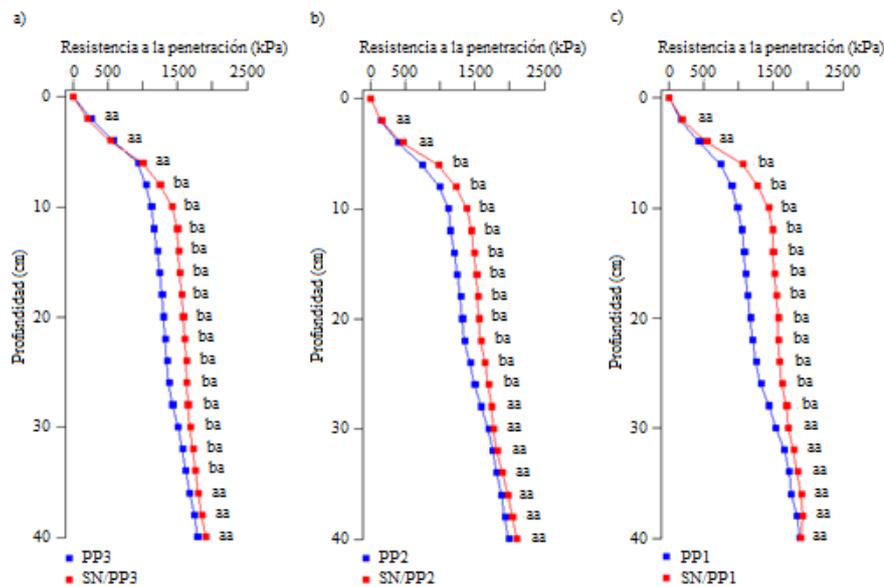


Figura 3. Respuesta en resistencia a la penetración del suelo (RP) por la utilización del paraplow en Atalaya: a) transcurridos 36 meses desde su utilización, b) transcurridos 18 meses desde su utilización, c) transcurridos 12 meses desde su utilización.

Letras distintas dentro de la misma profundidad de suelo indican diferencias significativas ($P < 0,05$).

Al igual que en el sitio experimental Atalaya, en Expoactiva la utilización del paraplow disminuyó la RP del suelo con respecto a los tratamientos sin paraplow transcurridos 12 meses, 18 meses y 36 meses desde su utilización (Figura 4). La reducción relativa de la RP fue mayor en los tratamientos donde había transcurrido menor tiempo desde la utilización del paraplow. La reducción relativa de la RP fue de 26%, 17% y 9% transcurridos 12 meses (8 a 18 cm), 18 meses (10 a 30 cm) y 36 meses (12 a 26 cm) desde la utilización del paraplow, respectivamente ($P < 0,05$) (Figura 4c, 4b y 4a). En este sitio el efecto residual del paraplow sobre la RP perduró durante 36 meses en el estrato de suelo de 12 a 18 cm.

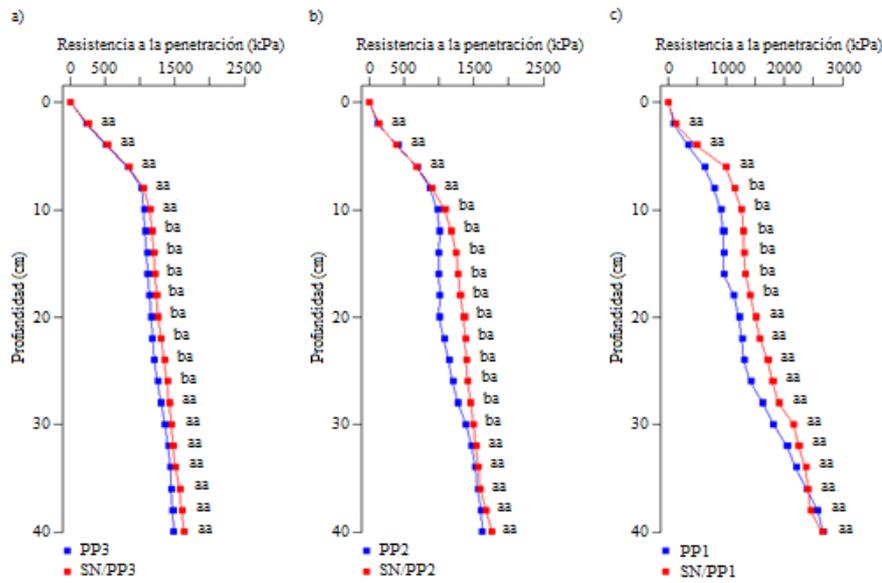


Figura 4. Respuesta en resistencia a la penetración del suelo (RP) por la utilización del paraplow en Expoactiva: a) transcurridos 36 meses desde su utilización, b) transcurridos 18 meses desde su utilización, c) transcurridos 12 meses desde su utilización.

Letras distintas dentro de la misma profundidad de suelo indican diferencias significativas ($P < 0,05$).

3.5.1.2. Análisis con inclusión de la variabilidad espacial

En Atalaya se generaron 2 zonas de ECa que se denominaron Alta y Baja por el rango de valores de ECaV y ECaH que se registraron dentro de cada zona (Figura 5a). En Expoactiva se delinearón 3 zonas de ECa denominadas Alta, Intermedia y Baja, al igual que en Atalaya por el rango de valores de ECaV y ECaH que se registraron dentro de cada zona (Figura 5b).

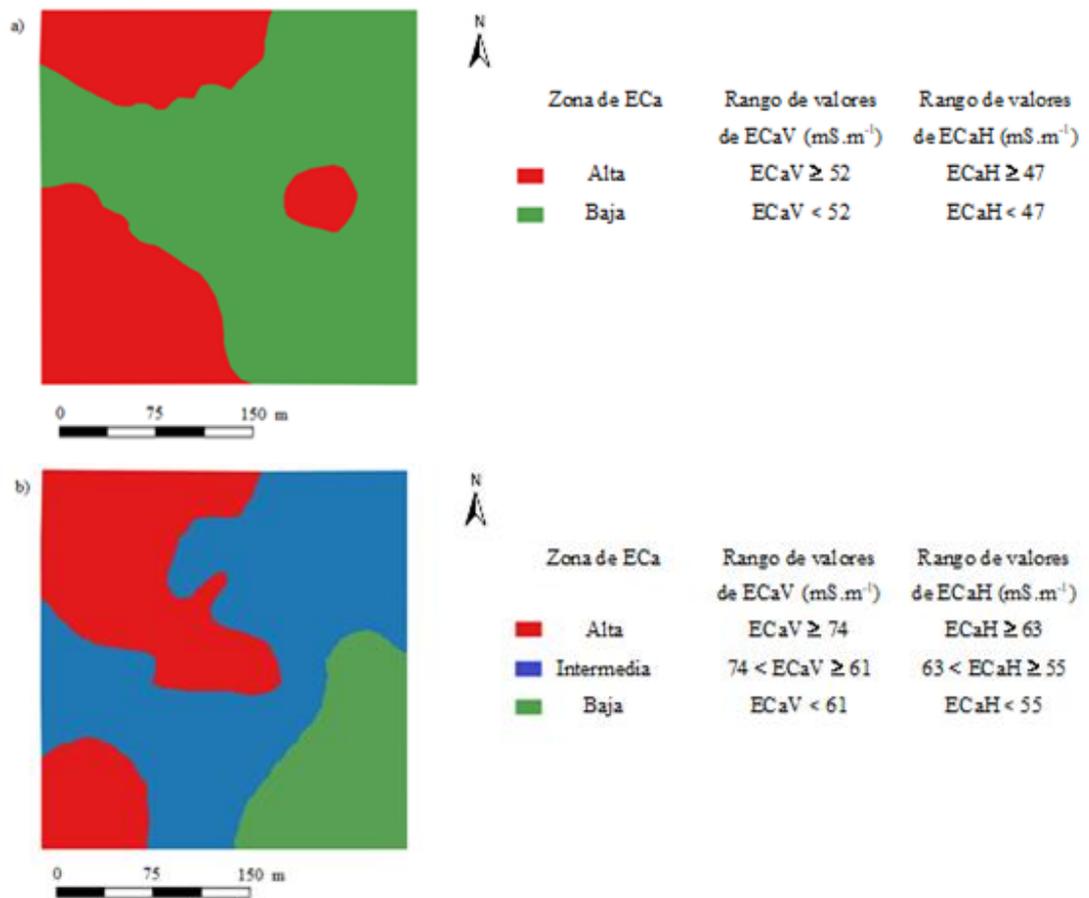


Figura 5. Delimitación de zonas de manejo sitio-específico mediante el procedimiento de medias c-difusas utilizando la electroconductividad aparente del suelo (mS.m⁻¹) en el dipolo vertical (ECaV) y horizontal (ECaH). a) Atalaya, b) Expoactiva.

En Atalaya la respuesta de la RP al uso del paraplow varió entre las zonas de Alta y Baja ECa, y también por el tiempo transcurrido desde su utilización (Figura 6). El tratamiento sin paraplow en zona de Baja ECa tuvo mayor RP que el tratamiento sin paraplow en zona de Alta ECa. Al comparar la reducción relativa entre zonas de ECa, se observó mayor reducción relativa de la RP por la utilización del paraplow en la zona de Baja ECa, excepto para la evaluación donde había transcurrido 12 meses desde su utilización. En la zona de Alta ECa la reducción relativa de la RP fue de 18%, 11% y 20% transcurridos 36 meses (8 a 36 cm), 18 meses (6 a 14 cm) y 12

meses (10 a 26 cm) desde la utilización del paraplow, respectivamente ($P < 0,05$) (Figura 6a, 6b y 6c). Mientras tanto, en la zona de Baja ECa la reducción relativa de la RP fue de 31%, 16% y 11% transcurridos 36 meses (8 a 20 cm), 18 meses (6 a 28 cm) y 12 meses (4 a 28 cm) desde la utilización del paraplow, respectivamente ($P < 0,05$) (Figura 6d, 6e, 6f). El efecto residual del paraplow sobre la RP perduró 36 meses en el estrato de suelo de 10 a 14 cm en la zona de Alta ECa y de 8 a 20 cm en la zona de Baja ECa.

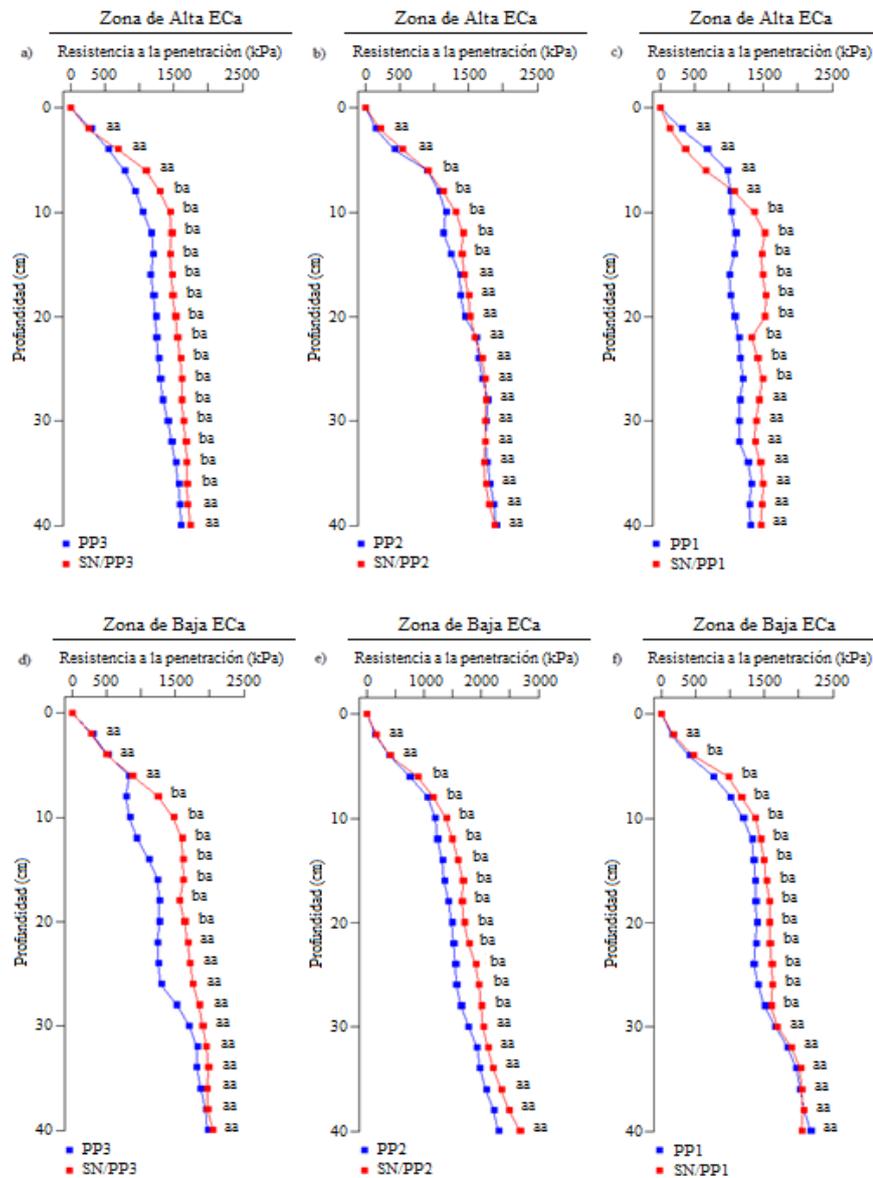


Figura 6. Respuesta en resistencia a la penetración del suelo (RP) por la utilización del paraplow en Atalaya: a) transcurridos 36 meses desde su utilización en zona de Alta ECa, b) transcurridos 18 meses desde su utilización en zona de Alta ECa, c) transcurrido 12 meses desde su utilización en zona de Alta ECa, d) transcurridos 36 meses desde su utilización en zona de Baja ECa, e) transcurridos 18 meses desde su utilización en zona de Baja ECa, f) transcurrido 12 meses desde su utilización en zona de Baja ECa.

Letras distintas dentro de la misma profundidad de suelo indican diferencias significativas ($P < 0,05$).

En Expoactiva al igual que en Atalaya, la respuesta de la RP al paraplow varió entre zonas de ECa y tiempo transcurrido desde su utilización (Figura 7). En la zona de Alta ECa, donde solo existieron tratamientos transcurridos 36 meses desde la utilización del paraplow, la reducción relativa de la RP fue de 4% en el estrato de suelo de 12 a 24 cm ($P < 0,05$) (Figura 7a). En la zona de Intermedia ECa se ubicaron tratamientos transcurridos 36 meses y 18 meses desde la utilización del paraplow. En esta zona, transcurridos 36 meses desde su utilización no se encontraron diferencias estadísticamente significativas en RP y luego de 18 meses se registró una reducción relativa de la RP de 23% en el estrato de suelo de 10 a 32 cm ($P < 0,05$) (Figura 7b y 7c). En la zona de Baja ECa se ubicaron tratamientos transcurridos 18 meses y 12 meses desde su utilización, en esta zona se observó una mayor reducción relativa de la RP en el tratamiento donde transcurrieron 12 meses desde la utilización del paraplow. La reducción relativa de la RP fue de 20% y 36% transcurridos 18 meses (12 a 30 cm y 38 a 40 cm) y 12 meses (4 a 26 cm) desde la utilización del paraplow, respectivamente ($P < 0,05$) (Figura 7d y 7e). El efecto residual del paraplow sobre la RP perduró durante 36 meses en la zona de Alta ECa (entre 12 a 24 cm) y 18 meses en las zonas de Intermedia (entre 10 a 32 cm) y Baja ECa (entre 12 a 26 cm), respectivamente.

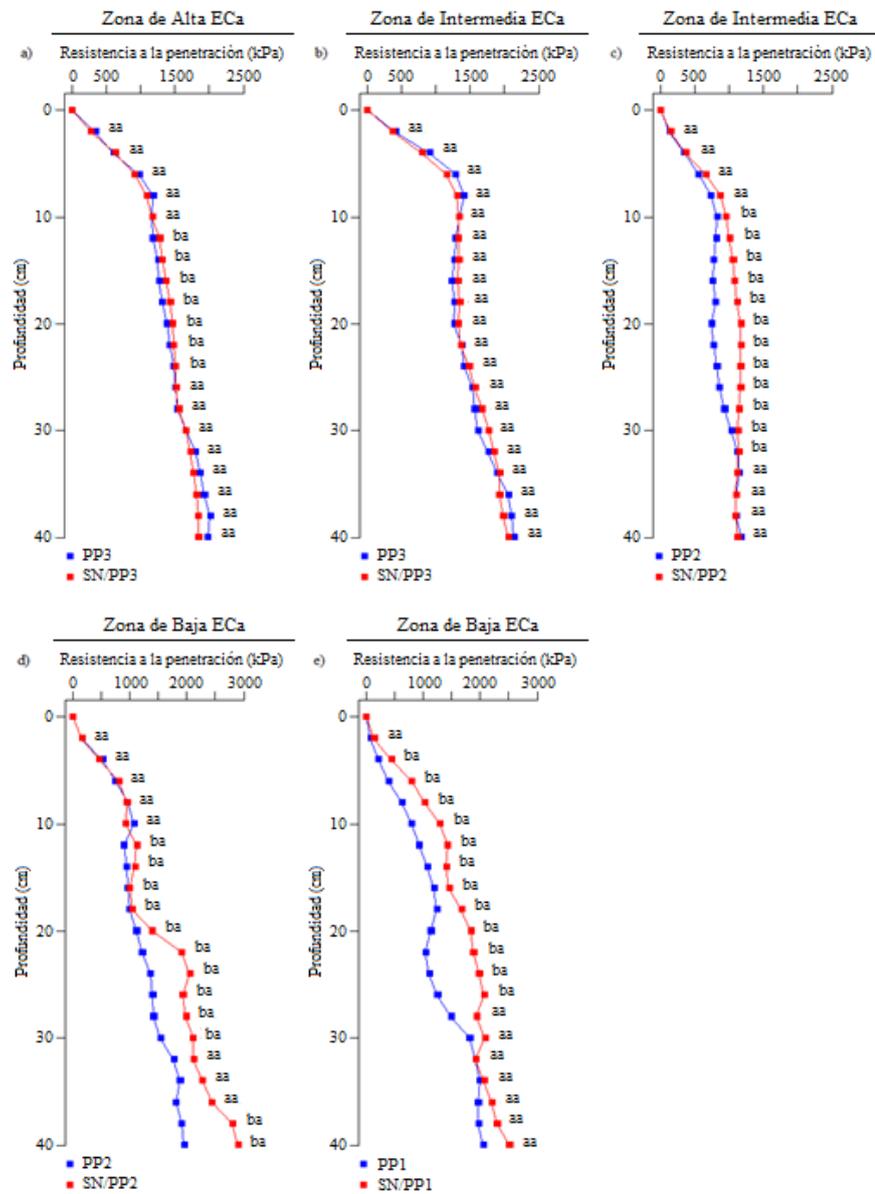


Figura 7. Respuesta en resistencia a la penetración del suelo (RP) por la utilización del paraplow en Expoactiva: a) transcurridos 36 meses desde su utilización en zona de Alta ECa, b) transcurridos 36 meses desde su utilización en zona de Intermedia ECa, c) transcurridos 18 meses desde su utilización en zona de Intermedia ECa, d) transcurridos 18 meses desde su utilización en zona de Baja ECa, e) transcurridos 12 meses desde su utilización en zona de Baja ECa.

Letras distintas dentro de la misma profundidad de suelo indican diferencias significativas ($P < 0,05$).

3.5.2. Rendimiento de maíz

3.5.2.1 Análisis con remoción de la variabilidad espacial

En Atalaya el uso del paraplow incrementó el rendimiento de maíz en 7% (592 kg/ha) y 4% (354 kg/ha) transcurridos 12 meses y 18 meses desde su utilización, respectivamente ($P < 0,05$) (Cuadro 1). Sin embargo, en Expoactiva no se observaron efectos significativos del paraplow sobre el rendimiento de maíz ($P < 0,05$) (Cuadro 1). El efecto residual del paraplow sobre el rendimiento de maíz alcanzó los 18 meses en Atalaya.

Cuadro 1. Rendimiento en grano de maíz (kg/ha) en el periodo de cultivo 2016-2017 en los tratamientos sin paraplow (SN/PP1, SN/PP2 y SN/PP3) y con paraplow 12 meses (PP1), 18 meses (PP2) y 36 meses (PP3) transcurridos desde su utilización en los sitios experimentales Atalaya y Expoactiva.

Sitios	Tratamientos					
	SN/PP3	PP3	SN/PP2	PP2	SN/PP1	PP1
	-----kg/ha-----					
Atalaya*	8610 a	8851 a	8314 b	8668 a	7962 b	8554 a
Expoactiva*	7905 a	8160 a	6292 a	6727 a	7308 a	7955 a

*Letras distintas en la misma fila indican diferencias significativas ($P < 0,05$).

3.5.2.2 Análisis con inclusión de la variabilidad espacial

En Atalaya la respuesta en rendimiento de maíz por la utilización del paraplow fue variable entre zonas. En la zona de Alta ECa no se observaron diferencias en rendimiento de maíz entre los tratamientos sin paraplow y con paraplow ($P < 0,05$) (Cuadro 2). En cambio, en la zona de Baja ECa la respuesta en rendimiento de maíz transcurridos 12 meses desde la utilización del paraplow fue de 8% (640 kg/ha) ($P < 0,05$) (Cuadro 2).

Cuadro 2. Rendimiento en grano de maíz (kg/ha) en el periodo de cultivo 2016-2017 en zonas delimitadas por ECa en los tratamientos sin paraplow (SN/PP1, SN/PP2 y SN/PP3) y con paraplow 12 meses (PP1), 18 meses (PP2) y 36 meses (PP3) transcurridos desde su utilización en el sitio experimental Atalaya.

Zonas de ECa	Tratamientos					
	SN/PP3	PP3	SN/PP2	PP2	SN/PP1	PP1
	-----kg/ha-----					
Alta*	8899 a	9328 a	7477 a	8139 a	7436 a	7646 a
Baja*	10240 a	9147 a	8872 a	8784 a	7941 b	8581 a

*Letras distintas en la misma fila indican diferencias significativas (P<0,05).

En Expoactiva no se observó respuesta en rendimiento de maíz por la utilización del paraplow en las distintas zonas y tiempo transcurrido desde su pasaje (P<0,05) (Cuadro 3).

Cuadro 3. Rendimiento en grano de maíz (kg/ha) en el periodo de cultivo 2016-2017 en zonas delimitadas por ECa en los tratamientos sin paraplow (SN/PP1, SN/PP2 y SN/PP3) y con paraplow 12 meses (PP1), 18 meses (PP2) y 36 meses (PP3) transcurridos desde su utilización en el sitio experimental Expoactiva.

Zonas de ECa	Tratamientos					
	SN/PP3	PP3	SN/PP2	PP2	SN/PP1	PP1
	-----kg/ha-----					
Alta*	8354 a	7629 a				
Intermedia*	8271 a	8934 a	7163 a	8114 a		
Baja*			5746 a	6872 a	8120 a	7582 a

*Letras distintas en la misma fila indican diferencias significativas (P<0,05).

3.6. DISCUSIÓN

3.6.1. Resistencia a la penetración

3.6.1.1. Análisis con remoción de la variabilidad espacial

La reducción de la RP por la utilización del paraplow (Figura 3 y 4) coincide con los resultados reportado por varios autores⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾⁽¹²⁾⁽¹³⁾⁽²¹⁾⁽²²⁾⁽²³⁾⁽²⁴⁾. Este efecto es generado por la acción directa de las púas del paraplow en el suelo, y en el espacio entre púas, por la vibración del avance de esta herramienta provocando la destrucción de capas compactadas⁽¹²⁾.

Un criterio utilizado para analizar el efecto del paraplow sobre la RP es el umbral crítico de 2000 kPa propuesto por Taylor y Garner⁽²⁵⁾, superando este valor se restringe el crecimiento radicular. En este sentido, en Atalaya solamente las fajas sin paraplow del bloque que evaluó los efectos transcurridos 18 meses (SN/PP2) superaron este umbral crítico a los 38 cm de suelo (Figura 3b). Ninguna situación con paraplow superó este valor crítico (Figura 3a, 3b y 3c). Por otro lado, en Expoactiva, este umbral fue superado en los tratamientos sin paraplow (SN/PP1) y con paraplow (PP1) transcurridos 12 meses desde su utilización, en la profundidad de suelo de 30 cm y 32 cm, respectivamente (Figura 4c). Esto indica que en ambos sitios experimentales no se presentaron valores elevados de RP como los reportados por Sudduth et al.⁽¹⁶⁾ y Sadras et al.⁽²²⁾ que alcanzaron valores cercanos a los 2000 kPa entre los 10 y 20 cm de suelo, o como los reportados por Busscher y Bauer⁽²⁶⁾ que registraron valores de 4410 kPa a 35 cm de profundidad de suelo.

En ambos sitios experimentales, la mayor reducción relativa de la RP fue observada transcurridos 12 meses desde la utilización del paraplow, sugiriendo una pérdida del efecto en el tiempo. Este hecho concuerda con los trabajos de Hamza y Anderson⁽¹²⁾, Busscher y Bauer⁽²⁶⁾ y Busscher et al.⁽²⁷⁾. La pérdida de efecto en el tiempo puede ser explicada por factores inherentes al manejo del suelo y los cultivos, por ejemplo: por

operaciones de siembra, fertilización, protección de cultivo y cosecha. Esta pérdida se incrementa cuando estas operaciones son realizadas con un alto contenido de humedad en el suelo⁽³⁾⁽¹⁶⁾⁽²¹⁾. Además, periodos de humedecimiento y secado generan una reconsolidación natural a través del proceso de infiltración de agua en el suelo⁽³⁾⁽²⁷⁾.

El efecto residual del paraplow sobre la RP del suelo alcanzó hasta 36 meses en ambos sitios experimentales. La ausencia o pérdida de efecto del paraplow en los primeros centímetros del suelo puede ser causada por el efecto del tráfico de maquinaria y por procesos de reconsolidación natural⁽³⁾⁽²¹⁾. En este sentido, Sadras et al.⁽²²⁾ indican en su trabajo que no hubo diferencias en RP en los primeros 10 cm de suelo, y Chan et al.⁽²¹⁾ indican que el efecto del paraplow sobre la RP en los primeros 10 cm de suelo perduró solo 12 meses. Las razones de la pérdida del efecto del paraplow sobre la RP a profundidades mayores a 18 cm en Expoactiva y a 26 cm en Atalaya no están claras. En este sentido, se pueden plantear dos hipótesis. La primera hace referencia al momento de realización de esta labor, que debe ocurrir con el suelo seco⁽¹¹⁾⁽²⁸⁾. En nuestra zona de estudio es difícil que ocurran momentos donde el perfil del suelo este seco por un periodo de tiempo prolongado para permitir el desarrollo de esta actividad. Sumado a esto, los suelos de ambos sitios experimentales presentan un incremento del contenido de arcilla en profundidad, y por lo tanto mayor capacidad de retención de agua con el aumento de la profundidad del suelo. En este sentido, se podría plantear el argumento propuesto por Balbuena et al. citado por Vallejos et al.⁽²⁹⁾ que indican que con un contenido elevado de humedad en el suelo al momento de la labor se genera una baja fisuración, por lo tanto, el suelo fluye entre las rejas en forma plástica sin provocar el efecto deseado. La segunda hipótesis hace referencia a los procesos de expansión y contracción de las arcillas que presentan los suelos de la zona de estudio. De acuerdo al trabajo realizado por DSA/FA/USDA, citado por Durán y García Préchac⁽³⁰⁾ las arcillas 2.1 dominantes de los Brunosoles son la montmorillonita e illita. La montmorillonita posee características expansivas con la variación del contenido de agua del suelo,

este proceso de expansión y contracción puede generar la pérdida del efecto del paraplow.

3.6.1.2. Análisis con inclusión de variabilidad espacial

La ECa captó la variabilidad espacial en el área de chacra, permitiendo delinear zonas con distintos niveles de RP. En ambos sitios, los tratamientos sin paraplow presentaron mayores valores de RP en las zonas de Baja ECa concordando con los resultados de Sudduth et al.⁽¹⁶⁾ y Machado et al.⁽³¹⁾. En este sentido, Sudduth et al.⁽¹⁶⁾ explica este comportamiento a partir de cambios encontrados en la textura del suelo dentro del área experimental, indicando que zonas de Alta ECa presentaron mayor contenido de arcilla y mayor contenido de agua en el suelo.

El paraplow redujo la RP del suelo y estos efectos fueron significativos transcurridos 12 meses, 18 meses y 36 meses desde su utilización (Figura 6 y 7), concordando con lo reportado mediante el análisis de remoción de la variabilidad espacial, con la excepción de la zona de Intermedia ECa en Expoactiva transcurridos 36 meses desde su utilización, donde no se observó respuesta en RP (Figura 7b).

En las zonas de Baja ECa de Atalaya y de Expoactiva se superó el valor de RP crítico de 2000 kPa⁽²⁵⁾ por debajo de los 30 cm de profundidad de suelo independientemente del uso o no del paraplow (Figura 6d, 6e, 6f, 7d y 7e). Mientras tanto, en las zonas de Alta ECa en ambos sitios este comportamiento no se registró (Figura 6a, 6b, 6c, 7a). En cambio, en la zona de Intermedia ECa solamente se superó el valor crítico en los tratamientos con paraplow y sin paraplow transcurridos 36 meses desde su utilización (Figura 7b). En las zonas donde se superó el valor crítico de RP, los tratamientos sin paraplow lo hicieron a menor profundidad de suelo concordando con lo reportado por Hamilton-Manns et al.⁽¹⁰⁾ y Hodgson et al.⁽²⁴⁾.

Estos aspectos marcan una clara diferencia en los valores de RP, y en el efecto del paraplow sobre la RP cuando se comparan las zonas de ECa contrastantes. Estos

resultados coinciden con los reportados por Sudduth et al.⁽¹⁶⁾, Machado et al.⁽³¹⁾ y Hoefler et al.⁽³²⁾, ellos concluyen que la ECa puede ser utilizada para captar distintas zonas de RP, y de esta manera tomar distintas acciones para mitigar las restricciones impuestas por la compactación de suelo. La información sugiere que de haberse dirigido el paraplow a las zonas de Baja ECa, se habría reducido el costo de esta actividad por la disminución del área subsolada (63% área de Baja ECa en Atalaya y 19% área de Baja ECa en Expoactiva) y un menor tiempo operativo de la tarea. A pesar de esto, Machado et al.⁽³¹⁾ indican que la realización de zonas de ECa no deberían sustituir los muestreos de RP, con estos resultados solamente se puede afirmar que la utilización de ECa es una técnica eficiente para representar o estimar la variabilidad espacial de la RP.

3.6.2. Rendimiento de maíz

3.6.2.1. Análisis con remoción de la variabilidad espacial

La respuesta en rendimiento de maíz por la utilización del paraplow fue distinta en ambos sitios, en Atalaya hubo respuesta y en Expoactiva no se registró (Cuadro 1). La respuesta en rendimiento en Atalaya fue de 4% y 7% en los tratamientos con paraplow transcurridos 18 meses y 12 meses desde su utilización. Estos incrementos de rendimiento se encuentran por debajo de los reportados por Martino⁽³³⁾, Ernst y Bentancur⁽³⁴⁾, y Erbach et al.⁽³⁵⁾. El aumento del rendimiento podría ser explicado por la menor RP del suelo posterior al pasaje del paraplow, que ocasionaría un aumento del desarrollo radicular, y por lo tanto un mayor potencial de captura de agua y nutrientes⁽⁷⁾.

La respuesta en rendimiento por la utilización del paraplow fue observada hasta los 18 meses, siendo esta residualidad inferior a la reportada por Reeder et al.⁽³⁶⁾ y Abu-Hamdeh⁽³⁷⁾ que alcanzaron los 2 años. Al comparar la respuesta en rendimiento por la utilización del paraplow transcurridos 12 meses (592 kg/ha) y 18 meses (354 kg/ha) se puede observar una disminución de la respuesta de 59% en un periodo de 6

meses. Esto podría estar asociado a la pérdida del efecto del paraplow sobre la RP, aspecto que está vinculado a procesos de reconsolidación natural y tráfico de maquinaria. Por lo tanto, el aumento de la RP con el tiempo desde el pasaje del paraplow repercutiría negativamente en el desarrollo radicular deprimiendo el crecimiento y rendimiento del cultivo. En este sentido, varios trabajos sugieren incorporar medidas de manejo como tráfico controlado⁽⁷⁾⁽²⁷⁾⁽³⁶⁾ o disminución de tráfico con zonas de descargas⁽⁶⁾ para atenuar la pérdida de efecto del paraplow sobre la RP, repercutiendo positivamente en la respuesta residual del paraplow sobre el rendimiento de los cultivos.

En Expoactiva no hubo respuesta en rendimiento. Esto coincide con lo reportado por Vepraskas et al.⁽³⁸⁾, que encontraron residualidad en RP a 3 años de haber realizado el subsolado de suelo pero sin beneficios en el rendimiento. El rendimiento alcanzado por un cultivo está determinado por factores de suelo, clima y manejo. Los efectos positivos del paraplow sobre la RP del suelo no siempre generan aumentos de rendimiento, debido a las complejas interacciones que ocurren entre los factores que determinan la producción de granos⁽⁹⁾.

3.6.2.2. Análisis con inclusión de la variabilidad espacial

Al analizar el rendimiento en las distintas zonas delimitadas por ECa se observó que no hubo respuesta al paraplow en rendimiento de maíz en ambos sitios experimentales (Cuadro 2 y 3), excepto en Atalaya en la zona de Baja ECa transcurridos 12 meses desde su utilización. La zona de Baja ECa era la de mayor probabilidad de respuesta en rendimiento de maíz al subsolado, considerando que fue la zona con mayor RP del suelo. Schneider et al.⁽²⁸⁾ concluyen de su meta-análisis con 1530 comparaciones de rendimientos en 67 sitios experimentales de regiones templadas, que cuando se reportaron capas que restringen el crecimiento radicular, la respuesta en rendimiento superó por más de 20% a los sitios sin capa que restringen el crecimiento radicular. En los sitios sin una capa que restrinja el crecimiento radicular se generaron efectos inconsistentes en el rendimiento, incluso llegaron a

observarse disminuciones. En este sentido, comparando los resultados con el trabajo mencionado anteriormente de Schneider et al.⁽²⁸⁾, se esperaría aumentos de rendimiento en la zona de Baja ECa y resultados inconsistentes en las zonas de Intermedia y Alta ECa.

En Atalaya la respuesta en rendimiento por la utilización del paraplow fue de 8% (640 kg/ha) en la zona de Baja ECa transcurridos 12 meses de su utilización, siendo inferior a la reportada por Schneider et al.⁽²⁸⁾, tomando a la zona de Baja ECa como zona que presenta restricción al crecimiento radicular por superar el valor crítico de 2000 kPa propuesto como restrictivo para el crecimiento radicular⁽²⁵⁾.

En Expoactiva no hubo respuesta en rendimiento al paraplow en ninguna zona de ECa, coincidiendo con lo reportado mediante el análisis de remoción de la variabilidad espacial. Este hecho concuerda con lo reportado por Busscher y Bauer⁽²⁶⁾ que indican que los tratamientos subsolados presentaron menor RP sin generar aumento de rendimiento. En este sentido, Busscher et al.⁽²⁷⁾ indican que incluso una recompactación incompleta puede explicar la falta de respuesta en rendimiento. Otro aspecto considerado por Sadras et al.⁽²²⁾ y Schneider et al.⁽²⁸⁾ es el régimen de precipitaciones, por encima de la media es donde no se permitiría expresar el efecto del paraplow, al contrario de lo que se observa con esta herramienta en años con moderado déficit hídrico. En los meses en los que transcurrió el periodo de cultivo, se registraron precipitaciones que superaron en 235 mm a la serie histórica 1980-2009 (Figura 1), siendo probablemente este aspecto el más importante a destacar para explicar la ausencia de respuesta en rendimiento en Expoactiva y la baja respuesta en el único caso donde se registró efecto positivo del paraplow sobre el rendimiento en Atalaya.

3.6.3 Comparación de análisis estadísticos

El análisis en zonas que incluye la variabilidad espacial a diferencia del método ISA que remueve la variabilidad espacial permitió ver que hay zonas de ECa con valores

de RP que superaron el valor propuesto como restrictivo para el crecimiento radicular⁽²⁵⁾. La remoción de la variabilidad espacial subestimó los valores de RP en estas zonas de chacra (Figura 3, 4, 6 y 7). Además, el análisis en zona muestra una respuesta diferencial de la utilización del paraplow, siendo mayor en zona de Baja ECa. Esto sugiere que la utilización del paraplow podría dirigirse hacia las zonas de Baja ECa, realizando la mitigación de la compactación del suelo en forma diferencial en zonas con alta RP. Esto ocasionaría un menor tiempo de uso operativo, menor uso de combustible fósil, y por tanto menores costos y emisiones.

En Expoactiva ambos análisis fueron consistentes demostrando la ausencia de respuesta en rendimiento de maíz por la utilización del paraplow. En cambio, en Atalaya con la remoción de la variabilidad espacial se observó respuesta en rendimiento hasta 18 meses transcurridos desde la utilización del paraplow. Con inclusión de la variabilidad espacial no hubo respuesta al pasaje del paraplow, excepto en zona de Baja ECa transcurridos 12 meses desde su utilización. En este sentido, la remoción de la variabilidad espacial sobrestimó la respuesta residual en el rendimiento de Atalaya al compararla con el análisis que incluye la variabilidad espacial.

Mallarino et al.⁽³⁹⁾ reportan que tecnologías de agricultura de precisión otorgan la posibilidad de mejorar la interpretación de los resultados en experimentos a escala comercial. En su trabajo la utilización de monitores de rendimiento permitió realizar zonas con Altos y Bajos rendimiento que presentaron distinta respuesta a la fertilización inicial. Estos autores concluyen que diferentes enfoques pueden resultar en diferentes interpretaciones, cualquier procedimiento usado es válido, pero los juicios agronómicos deben continuar jugando el mayor rol en la selección del análisis más apropiado, de esta manera se logrará el objetivo de los experimentos y la correcta interpretación de los resultados.

3.7. CONCLUSIONES

La utilización del paraplow permitió reducir la RP del suelo en ambos sitios experimentales. Cuando no se tiene en cuenta la variabilidad espacial se subestiman los valores de RP en aquellas zonas donde la RP superó el límite impuesto como restrictivo para el crecimiento radicular.

La ECa es una herramienta que permitió captar la variabilidad espacial de la RP e identificar zonas con diferente nivel de compactación. Las zonas de menor ECa fueron las de mayor RP del suelo presentando una mejor respuesta al paraplow, que perduró entre 18 y 36 meses.

No se registró respuesta en rendimiento, excepto en zona de Baja ECa en Atalaya transcurridos 12 meses desde la utilización del paraplow. La ausencia de respuesta en rendimiento puede atribuirse a las buenas condiciones hídricas durante el periodo de cultivo.

El manejo sitio-específico de la RP mediante las zonas de ECa permitiría dirigir el uso del paraplow sobre zonas con alta RP, repercutiendo positivamente en el costo y tiempo necesario para la utilización del paraplow. A pesar de esto, la inconsistente respuesta en rendimiento indica que deberían incluirse aspectos económicos en la toma de decisiones para mitigar la compactación del suelo con paraplow.

3.8. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Facultad de Agronomía, INIA y AUSID, por la financiación de las actividades a través del Proyecto de Promoción y Tecnología Agropecuaria 337.

3.9. BIBLIOGRAFÍA

1. Soil Science Society of America. Glossary of Soil Science Terms. Madison: Soil Science Society of America, Inc; 1996. p. 134.
2. Larson WE, Eynard A, Hadas A, Lipiec, J. Control and avoidance of soil compaction in practice. En: Soane BD, van Ouwerkerk C, editores. Soil Compaction in Crop Production. Amsterdam: Elsevier Science B.V; 1994. p. 597-625.
3. Horn R, Domzal H, Slowinska-Jurkiewicz A, Van Ouwerkerk C. Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils and the environment. Soil Tillage Res. 1995;35(1-2):23-36.
4. Hamza MA, Anderson WK. Soil compaction in cropping systems a review of the nature, causes and possible solutions. Soil Tillage Res. 2005;82(2):121-45.
5. Ernst O, Siri G. La agricultura en Uruguay, su trayectoria y consecuencias. En: Ribeiro A, editor. Simposio Nacional de Agricultura. Montevideo: Facultad de Agronomía; 2011. p. 149-63.
6. Botta GF, Pozzolo O, Bomben M, Rosatto H, Rivero D, Ressia M, Tourn M, Soza E, Vázquez J. Traffic alternatives for harvesting soybean (*Glycine max* L.): Effect on yields and soil under a direct sowing system. Soil Tillage Res. 2007;96(1-2):145-54.
7. West TD, Griffith DR, Steinhardt GC. Effect of Paraplowing on crop yields with no-till planting. J Prod Agric. 1996;9(2):233-7.
8. Martino DL. Manejo de restricciones físicas del suelo en sistemas de siembra Directa. En: Díaz Rossello R, editor. Siembra Directa en el Cono Sur. Montevideo: PROCISUR 2001; 2001. p. 225-57.

9. Braim MA, Chaney K, Hodgson DR. Preliminary investigation on the response of spring barley (*Hordeum sativum*) to soil cultivation with the Paraplow. *Soil Tillage Res.* 1984;4(3):277-93.
10. Hamilton-Manns M, Ross CW, Horne DJ, Backer CJ. 2002. Subsoil loosening does little to enhance the transition to no-tillage on structurally degraded soil. *Soil & Tillage Research.* 2002;68(2):109-19.
11. Franzluebbbers AJ, Schomberg HH, Endale DM. Surface-soil responses to paraplowing of long-term no-tillage cropland in the Southern Piedmont USA. *Soil & Tillage Res.* 2007;96(1-2):303-15.
12. Hamza MA, Anderson WK. Combinations of ripping depth and tine spacing for compacted sandy and clayey soils. *Soil Tillage Res.* 2008;99(2):213-20.
13. Álvarez C, Torres M, Chamorro E, D´Ambrosio D, Taboada M. Descompactación de suelos franco limosos en siembra directa: efectos sobre las propiedades edáficas y los cultivos. *Cienc Suelo.* 2009;27(2):159-69.
14. Altamirano A, Da Silva H, Durán A, Echeverría A, Panario D, Puentes R. Descripciones, datos físicos y químicos de los suelos dominantes. En: Altamirano A, Da Silva H, Durán A, Echeverría A, Panario D, Puentes R, editores. *Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay.* Montevideo: MAP; 1976. p. 85-8.
15. Inumet. Boletín pluviométrico. [Internet]. 2020. [citado 15 de mayo 2020]. Disponible desde: <https://www.inumet.gub.uy/clima/recursos-hidricos/boletin-pluviometrico>.
16. Sudduth KA, Kitchen NR, Chung S, Drummond ST. Site-specific compaction, soil physical property, and crop yield relationships for claypan soils. En: ASABE Meeting Presentation Paper Number: 1009432, editor. American Society of

Agricultural and Biological Engineers Annual International Meeting; 2010 Junio 20-23; Pittsburg. Michigan: American Society of Agricultural and Biological Engineers; 2010. p. 1-17.

17. Rimik CP 20. Rimik CP 20 Cone penetrometer hardware instruction manual. [Internet]. 2000. [citado 15 de mayo 2020];1-22. Disponible desde: <https://www.rimik.com/PDF%20file/CP20%20Manual.pdf>.

18. Zas R. Iterative kriging for removing spatial autocorrelation in analysis of forest genetic trials. *Tree Genet Genomes*. 2006;2(4):177-85.

19. Fridgen JJ, Kitchen NR, Sudduth KA, Drummond ST, Wiebold WJ, Fraisse CW. Management Zone Analyst (MZA): Software for subfield management zone delineation. *Agron J*. 2004;96:100-8.

20. R Core Team. R: A language and environment for statistical computing [Internet]. Vienna: R Foundation for Statical Computing; 2017 [citado 15 de mayo 2020]. Disponible desde: <https://www.R-project.org/>.

21. Chan KY, Oates A, Swan AD, Hayes RC, Dear BS, Peoples MB. Agronomic consequences of tractor wheel compaction on a clay soil. *Soil Tillage Res*. 2006;89(1):13-21.

22. Sadras VO, O'Leary GJ, Roget DK. Crop responses to compacted soil: capture and efficiency in the use of water and radiation. *F Crops Res*. 2005;91(1-2):131-48.

23. Busscher WJ, Frederick JR, Bauer PJ. Timing effects of deep tillage on penetration resistance and wheat and soybean yield. *Soil Sci Soc Am J*. 2000;64(3):999-1003.

24. Hodgson DR, Hipps NA, Braim MA. Direct drilling compared with ploughing for winter wheat grown continuously and the effects of subsoiling. *Soil Use Manag.* 1989;5(4):189-94.
25. Taylor HM, Gardner HR. Penetration of cotton seedling taproots as influenced by bulk density, moisture content, and strength of the soil. *Soil Sci.* 1963;96(3):153-56.
26. Busscher WJ, Bauer PJ. Soil strength, cotton root growth and lint yield in a southeastern USA coastal loamy sand. *Soil Tillage Res.* 2003;74(2):151-9.
27. Busscher WJ, Bauer PJ, Frederick JR. Recompaction of a coastal loamy sand after deep tillage as a function of subsequent cumulative rainfall. *Soil & Tillage Research.* 2002;68(1):49-57.
28. Schneider F, Axel D, Hennings I, Schmittmann O, Seidel SJ. The effect of deep tillage on crop yield. What do we really know?. *Soil Tillage Res.* 2017;174:193-204.
29. Vallejos A, Kees M, Bondía P, Echeverría N, Silenzi J, Zajac C, De Lucia M. Subsulado en siembra directa; efectos sobre parámetros físicos del suelo y el rendimiento de soja. *Cienc Suelo.* 2014;32(2):291-300.
30. Durán A, García Préchac F. Clasificación y caracterización de los suelos. En: Durán A, García Préchac F, editores. *Suelos del Uruguay: origen, clasificación, manejo y conservación.* Montevideo: Hemisferio Sur; 2007. p. 75-333.
31. Machado G, Dafonte J, Bueno J, Valcárcel M, Farías E. Using soil apparent electrical conductivity to optimize sampling of soil penetration resistance and to improve the estimations of spatial patterns of soil compaction. *Sci World J.* 2014;2014:1-12.

32. Hoefler G, Bachmann J, Hartge KH. Can the EM38 probe detect spatial patterns of subsoil compaction?. En: Viscarra RA, McBratney AB, Minasny B, editores. Proximal Soil Sensing. Dordrecht: Springer Science+Business Media B.V; 2010. p. 265-73.
33. Martino DL. Alleviation of soil physical constraints in direct-seeding systems in Uruguay. Tesis PhD. Manitoba, Canada. University of Manitoba; 1998. p. 264 .
34. Ernst O, Bentancur, O. Efecto del laboreo sub-superficial y manejo del barbecho químico sobre la disponibilidad de N-NO₃- en el suelo y rendimiento de maíz en siembra directa después de avena pastoreada. Agrociencia. 2004;8(1):29-40.
35. Erbach DC, Benjamin JG, Crusier RM, Elamin MA, Mukhtar S, Choi CH. Soil and corn response to tillage with paraplow. Trans Am Soc Agric Eng. 1992;35(5):1347-54.
36. Reeder RC, Wood RK, Finck CL. Five subsoiler designs and their effects on soil properties and crop yields. Trans Am Soc Agric Eng. 1993;36(6):1525-31.
37. Abu-Hamdeh NH. Compaction and Subsoiling Effects on Corn Growth and Soil Bulk Density. Soil Sci Soc Am J. 2003;67(4):1213-9.
38. Vepraskas MJ, Busscher WJ, Edwards JH. Residual effects of deep tillage versus no-till on corn root growth and grain yield. J Prod Agric. 1995;8(3):401-5.
39. Mallarino AP, Bermudez M, Wittry DJ, Hinz PN. Alternative data managements and interpretations for strip trials harvested with yield monitors. En: Robert PC, Rust RH, Larson WE, editors. Proceedings of the Fifth International Conference on Precision Agriculture; 2000 julio 16-19; Iowa. Bloomington: American Society of Agronomy; 2000. p. 1-12.

4. DISCUSIÓN GENERAL

El uso de un sensor de ECa permitió captar la variabilidad espacial de la RP a escala de chacras. La ECa se correlacionó con la RP con valores entre -0,44 y -0,77, similares a los reportados por Sudduth et al. (2010) y Machado et al. (2014). La relación entre RP y ECa está asociada a los cambios que genera la compactación del suelo en la densidad aparente y en la capacidad de almacenaje de agua en el suelo, siendo aspectos que afectan tanto a las mediciones de RP y como las de ECa (Brevik y Fenton, 2004).

Las zonas de manejo sitio-específico se realizaron en base a los valores de ECaV y ECaH. El relevamiento de los atributos de terreno se basó en antecedentes que destacaron al menos un atributo de terreno como una variable importante a tener en cuenta para captar la variabilidad espacial en sus sitios experimentales (Fraisse et al., 2001, Fridgen et al., 2004, Kitchen et al., 2005, Thompson et al., 2006). En este trabajo, los atributos de terreno presentaron bajas correlaciones con la RP provocando un menor desempeño de los indicadores FPI y NCI, generando un aumento de la heterogeneidad de los valores de RP dentro de cada zona.

Las zonas de ECa tuvieron diferencias significativas de RP permitiendo delinear áreas compactadas ubicadas en la zona de Baja ECa, incluso superando el límite de 2000 kPa propuesto como restrictivo para el crecimiento radicular (Taylor y Garner, 1963). Las zonas de Baja ECa ya habían sido propuestas como zonas con alta RP en los trabajos realizados por Sudduth et al. (2010) y Machado et al. (2014). El manejo sitio-específico de la compactación mediante zonas delimitadas por ECa podría utilizarse en la toma de decisiones para mitigar la compactación de suelo en las áreas que representen un problema.

Las correlaciones entre ECa y rendimiento de maíz no fueron significativas en la mayoría de los casos. Este escenario es reportado por Kitchen et al. (1999) y Stadler et al. (2015) indicando que las complejas relaciones suelo-planta-ambiente no pueden

ser captadas con una relación directa entre ECa y rendimiento, siendo necesaria la utilización de más información como la relacionada con la fertilidad del suelo, atributos topográficos, implantación de cultivos y también información relacionada con malezas, plagas y enfermedades.

El rendimiento de maíz no presentó diferencias estadísticamente significativas entre zonas de ECa. Este hecho no era esperable, debido a que la RP en la zona de Baja ECa superó el valor crítico de 2000 kPa propuesto como restrictivo para el crecimiento radicular (Taylor y Garner, 1963), aspecto que repercutiría negativamente en el desarrollo radicular y por lo tanto en el potencial de captura de agua y nutrientes. Sadras et al. (2005) indica que, bajo escenarios de elevadas precipitaciones en la estación de crecimiento del cultivo, las restricciones impuestas en el crecimiento radicular por elevada RP no representarían un problema en el suministro de agua y nutrientes, y de esta manera el rendimiento no sería afectado. En este sentido, las precipitaciones registradas en el periodo de cultivo superaron en 235 mm a la serie histórica de 1980-2009 (Inumet, 2020).

La respuesta de la RP por la utilización del paraplow fue abordada mediante dos análisis, el primero consistió en remover la variabilidad espacial y el segundo la incluyó mediante las zonas delimitadas por ECa. El paraplow como medida de mitigación de la compactación del suelo mostró una clara disminución de la RP. En cambio, al comparar la respuesta del paraplow entre ambos análisis se observó que la remoción de la variabilidad espacial subestimó los valores de RP en zonas de Baja ECa y sobrestimó la respuesta residual en rendimiento de maíz.

La residualidad de la RP alcanzó 36 meses en la zona de Alta y Baja ECa en Atalaya, en Expoactiva alcanzó 36 meses en la zona de Alta ECa, y 18 meses en la zona de Intermedia y Baja ECa. Este es un aspecto importante para destacar, debido a que el efecto residual sobre la RP podría generar efectos positivos sobre el rendimiento de los siguientes cultivos que integran la rotación agrícola. En este sentido, varios trabajos indican respuesta en rendimiento al uso del paraplow sobre trigo (Sadras et

al., 2005; Hamilton-Manns et al., 2002), cebada (Braim et al., 1984; Hamza y Anderson, 2008), colza (Chan et al., 2006) y soja (Busscher et al., 2000; Vallejos et al., 2014), que en Uruguay junto a maíz son los principales cultivos que integran las rotaciones de agricultura continua.

Con relación al rendimiento, era esperable obtener respuesta al pasaje del paraplow en la zona de Baja ECa, siendo mayor la respuesta con menor tiempo transcurrido desde la utilización del paraplow y la determinación del rendimiento. Esta hipótesis se basa en la mayor respuesta obtenida en la RP por la utilización del paraplow en esta zona. A pesar de esto, no se registró respuesta en rendimiento, excepto en Atalaya en zona de Baja ECa en el tratamiento con paraplow transcurridos 12 meses desde su utilización. Este hecho puede ser explicado por las elevadas precipitaciones ocurridas en el periodo de cultivo. En este sentido Sadras et al. (2005) y Schneider et al. (2017) destacan al régimen de precipitaciones como un aspecto importante en la ausencia de efectos positivos sobre el rendimiento por la utilización del paraplow, observando respuesta en rendimiento en años con moderado déficit hídrico.

A través de un manejo sitio-específico de la RP mediante zonas de ECa, el paraplow podría haber sido utilizado en la zona de Baja ECa. De esta forma, el paraplow se hubiera realizado en un 63% del área de chacra en Atalaya, y en un 19% en Expoactiva. A pesar de esto, sería necesario incluir aspectos económicos en la toma de decisiones, debido al alto costo de la mitigación de la compactación por la utilización del paraplow, sumado a la ausencia de respuesta en rendimiento. Además, sería necesario estudiar la respuesta en rendimiento del paraplow sobre otros cultivos que integran las rotaciones agrícolas, ya que la residualidad del paraplow sobre la RP perduraría varios periodos de cultivo.

5. CONCLUSIONES

La ECa representó la variabilidad espacial de la RP en los sitios experimentales, permitiendo identificar zonas que presentaron distintos valores de RP. La inclusión de los atributos de terreno no mejoró la definición de zonas.

El paraplow redujo la RP en ambos sitios, su efecto perduró entre 18 y 36 meses. No se registró respuesta en rendimiento, excepto en Atalaya en la zona de Baja ECa donde la productividad del tratamiento subsolado fue 8% superior al testigo sin subsolar transcurridos 12 meses desde la utilización del paraplow.

El análisis estadístico con remoción de la variabilidad espacial no permitió identificar en ambos sitios experimentales zonas donde la RP superaba el límite considerado como restrictivo para el crecimiento radicular. Además, sobrestimó el efecto residual sobre el rendimiento de maíz en comparación al análisis con inclusión de la variabilidad espacial. Adicionalmente, la inclusión de la variabilidad espacial de la RP a través de la utilización de la ECa permitiría realizar una mitigación diferencial de la compactación del suelo en zonas con alta RP, repercutiendo positivamente en el costo y tiempo necesario para la utilización del paraplow.

A pesar de este hecho, sería necesario incluir aspectos económicos en la toma de decisiones para mitigar la compactación del suelo con paraplow debido a la ausencia de respuesta en rendimiento de maíz.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Al-Gaadi KA. 2012. Employing electromagnetic induction technique for the assessment of soil compaction. *American Journal of Agricultural and Biological Sciences*, 7(4): 425-434. doi: 10.3844/ajabssp.2012.425.434.
- Álvarez C, Torres M, Chamorro E, D'Ambrosio D, Taboada M. 2009. Descompactación de suelos franco limosos en siembra directa: efectos sobre las propiedades edáficas y los cultivos. *Ciencia del Suelo*, 27: 159-169.
- Braim MA, Chaney K, Hodgson DR. 1984. Preliminary investigation on the response of spring barley (*Hordeum sativum*) to soil cultivation with the Paraplow. *Soil & Tillage Research*, 4: 277-293.
- Brevik EC, Fenton TE. 2004. The effect of changes in bulk density on soil electrical conductivity as measured with the Geonics® EM-38. *Soil Survey Horizons*, 45(3): 96-102.
- Busscher WJ, Bauer PJ, Frederick JR. 2002. Recomposition of a coastal loamy sand after deep tillage as a function of subsequent cumulative rainfall. *Soil & Tillage Research*, 68: 49-57.
- Busscher WJ, Frederick JR, Bauer PJ. 2000. Timing effects of deep tillage on penetration resistance and wheat and soybean yield. *Soil Science Society of America Journal*, 64: 999-1003.
- Chan KY, Oates A, Swan AD, Hayes RC, Dear BS, Peoples MB. 2006. Agronomic consequences of tractor wheel compaction on a clay soil. *Soil & Tillage Research*, 89: 13-21. doi:10.1016/j.still.2005.06.007.

- Coitiño J, Barbazán M, Ernst O. 2015. Conductividad eléctrica aparente para delimitar zonas de manejo en un suelo agrícola con reducida variabilidad en propiedades físico-químicas. *Agrociencia Uruguay*, 19(1): 102-111.
- Corwin DL, Lesch SM. 2003. Application of soil electrical conductivity to precision agriculture: theory, principles, and guidelines. *Agronomy Journal*, 95: 455-471.
- Dabala L, Ernst O, Etchegoimberry P, Cadenazzi M, Izaguirre R. 2019. Descompactación sub superficial del suelo en sistemas de agricultura continua sin laboreo. Montevideo: INIA, 2019. 26 p.
- Defossez P, Richard G. 2002. Models of soil compaction due to traffic and their evaluation. *Soil & Tillage Research*, 67: 41-64.
- Doolittle JA, Brevik EC. 2014. The use of electromagnetic induction techniques in soils studies. *Geoderma*, 223-225: 33-45. doi: /10.1016/j.geoderma.2014.01.027.
- Ernst O, Siri G. 2011. La agricultura en Uruguay, su trayectoria y consecuencias. En: Ribeiro A. (Eds.). Segundo Simposio Nacional de Agricultura. Montevideo: Universidad de la República. 149-163.
- Ernst O, Bentancur, O. 2004. Efecto del laboreo sub-superficial y manejo del barbecho químico sobre la disponibilidad de N-NO₃- en el suelo y rendimiento de maíz en siembra directa después de avena pastoreada. *Agrociencia*, 8(1): 29-40.
- Etchegoimberry P, Ernst O. 2018. Respuesta del cultivo de soja a la descompactación sub_superficial del suelo. *Cangüé*, 41: 4-9.

- Fraisse CW, Sudduth KA, Kitchen NR. 2001. Delineation of site-specific management zones by unsupervised classification of topographic attribute and soil electrical conductivity. *American Society of Agricultural Engineers*, 44(1): 155-166.
- Franzluebbers AJ, Schomberg HH, Endale DM. 2007. Surface-soil responses to paraplowing of long-term no-tillage cropland in the Southern Piedmont USA. *Soil & Tillage Research*, 96: 303-315. doi: :10.1016/j.still.2007.07.001.
- Fridgen JJ, Kitchen NR, Sudduth KA, Drummond ST, Wiebold WJ, Fraisse CW. 2004. Management Zone Analyst (MZA): Software for subfield management zone delineation. *Agronomy Journal*, 96: 100-108.
- Hamilton-Manns M, Ross CW, Horne DJ, Backer CJ. 2002. Subsoil loosening does little to enhance the transition to no-tillage on structurally degraded soil. *Soil & Tillage Research*, 68: 109-119.
- Hamza MA, Anderson WK. 2008. Combinations of ripping depth and tine spacing for compacted sandy and clayey soils. *Soil & Tillage Research*, 99: 213-220. doi:10.1016/j.still.2008.02.005.
- Hamza MA, Anderson WK. 2005. Soil compaction in cropping systems a review of the nature, causes and possible solutions. *Soil & Tillage Research*, 82: 121-145. doi: :10.1016/j.still.2004.08.009.
- Hoefler G, Bachmann J, Hartge KH. 2010. Can the EM38 probe detect spatial patterns of subsoil compaction?. En: Viscarra RA, McBratney AB, Minasny B. (Eds.). *Proximal Soil Sensing*. Dordrecht: Springer Science+Business Media B.V. 265-273.

- Horn R, Domzal H, Slowinska-Jurkiewicz A, Van Ouwerkerk C. 1995. Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils and the environment. *Soil & Tillage Research*, 35: 23-36.
- Inumet. 2020. Boletín pluviométrico. [En línea]. 15 de mayo 2020. <https://www.inumet.gub.uy/clima/recursos-hidricos/boletin-pluviometrico>.
- Kitchen NR, Sudduth KA, Myers DB, Drummond ST, Hong SY. 2005. Delineating productivity zones on claypan soil fields using apparent soil electrical conductivity. *Computers and Electronics in Agriculture*, 46: 285-308. doi:10.1016/j.compag.2004.11.012.
- Kitchen NR, Sudduth KA, Drummond ST. 1999. Soil electrical conductivity as a crop productivity measure for claypan soils. *Journal of Production Agriculture*, 12(4): 607-617.
- Larson WE, Eynard A, Hadas A, Lipiec, J. 1994. Control and avoidance of soil compaction in practice. En: Soane BD, van Ouwerkerk C. (Eds.). *Soil Compaction in Crop Production*. Amsterdam: Elsevier Science B.V. 597-625.
- Lund ED, Christy CD, Drummond PE. 1999. Practical applications of soil electrical conductivity Mapping. En: *European Conference on Precision Agriculture (2º, 1999, Odense, Dinamarca)*. Precision Agriculture '99. Sheffield. Sheffield Academic Press. 771-780.
- Machado G, Dafonte J, Bueno J, Valcárcel M, Farías E. 2014. Using soil apparent electrical conductivity to optimize sampling of soil penetration resistance and to improve the estimations of spatial patterns of soil compaction. *The Scientific World Journal*, 2014: 1-12. doi: 10.1155/2014/269480.

- Martino DL. 1998. Alleviation of soil physical constraints in direct-seeding systems in Uruguay. Tesis Ph.D. Manitoba, Canada. University of Manitoba. 264 p.
- McNeill JD. 1992. Rapid, accurate mapping of soil salinity by electromagnetic ground conductivity meters. En: Topp GC, Reynolds WD, Green RE. (Eds.). Advances in measurement of soil physical properties: Bringing theory into practice. Madison: Soil Science Society of America, Inc. 209-229.
- Peralta NR, Costa JL, Balzarini M, Angelini H. 2013. Delineation of management zones with measurements of soil apparent electrical conductivity in the south eastern pampas. Canadian Journal of Soil Science, 93: 205-218. doi:10.4141/CJSS2012-022.
- Pierce F, Nowak P. 1999. Aspects of precision agriculture. En: Sparks DL. (Eds.). Advance in Agronomy 67. San Diego: Academic Press. 1-85.
- Pravia V. 2009. Uso de los elementos de agricultura de precisión y modelos de simulación para la incorporación de la dimensión espacio temporal en la investigación de cultivos agrícolas: A) Impacto de prácticas de manejo de suelos y atributos del terreno en la productividad de sorgo a escala de chacra, B) Simulación de la producción de arroz en Uruguay utilizando el modelo DSSATv4 CERES-Rice. Tesis MSc. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 102 p.
- Rhoades JD, Corwin DL. 1990. Soil electrical conductivity: Effects of soil properties and application to soil salinity appraisal. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 21(11-12): 837-860.
- Sadras VO, O'Leary GJ, Roget DK. 2005. Crop responses to compacted soil: capture and efficiency in the use of water and radiation. Field Crops Research, 91: 131-148. doi:10.1016/j.fcr.2004.06.011.

- Schneider F, Axel D, Hennings I, Schmittmann O, Seidel SJ. 2017. The effect of deep tillage on crop yield. What do we really know?. *Soil & Tillage Research*, 174: 193-204. doi: 10.1016/j.still.2017.07.005.
- Soil Science Society of America. 1996. *Glossary of Soil Science Terms*. Madison: Soil Science Society of America, Inc. 134 p.
- Spoor G, Tijink FGJ, Weisskopf P. 2003. Subsoil compaction: risk, avoidance, identification and alleviation. *Soil & Tillage Research*, 73: 175-182. doi:10.1016/S0167-1987(03)00109-0.
- Stadler A, Rudolph S, Kupisch M, Langensiepen M, van der Kruk J, Ewert F. 2015. Quantifying the effects of soil variability on crop growth using apparent soil electrical conductivity measurements. *European Journal of Agronomy*, 64: 8-20. doi: 10.1016/j.eja.2014.12.004.
- Sudduth KA, Kitchen NR, Chung S, Drummond ST. 2010. Site-specific compaction, soil physical property, and crop yield relationships for claypan soils. En: *American Society of Agricultural and Biological Engineers Annual International Meeting (2010, Pittsburgh)*. ASABE Meeting Presentation Paper Number: 1009432. Michigan. American Society of Agricultural and Biological Engineers. 1-17.
- Sudduth KA, Drummond ST, Kitchen NR. 2001. Accuracy issues in electromagnetic induction sensing of soil electrical conductivity for precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 31: 239-264.
- Taylor HM, Gardner HR. 1963. Penetration of cotton seedling taproots as influenced by bulk density, moisture content, and strength of the soil. *Soil Science*, 96(3): 153-156.

- Thompson JA, Pena-Yewtukhiw EM, Grove JH. 2006. Soil–landscape modeling across a physiographic region: Topographic patterns and model transportability. *Geoderma*, 133: 57-70. doi:10.1016/j.geoderma.2006.03.037.
- Vallejos A, Kees M, Bondia P, Echeverría N, Silenzi J, Zajac C, De Lucia M. 2014. Subsolado en siembra directa; efectos sobre parámetros físicos del suelo y el rendimiento de soja. *Ciencia del Suelo*, 32(2): 291-300.
- West TD, Griffith DR, Steinhardt GC. 1996. Effect of Paraplowing on crop yields with no-till planting. *Journal of Production Agriculture*, 9(2): 233-237.