

TOMOGRAFÍA DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA PARA DETECTAR IMPACTOS CAMBIOS EN LAS PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO, RESULTANTES DEL LABOREO CON TRACCIÓN ANIMAL Y MOTORIZADA

J. Dafonte¹, A. García-Tomillo², T. de Figueiredo³, R.S. Barbieri⁴, F. Fonseca³, J. Rodrigues⁵, I.R.C. Araujo², R.J. Vargas⁶, D.H. Bandeira², R. Montanari⁴, R.V. dos Santos³, O.V. Costa^{3,7}

¹ Departamento de Ingeniería Agroforestal, Universidad de Santiago de Compostela – Benigno Ledo s/n. CP-27002, Lugo, España. jorge.dafonte@usc.es

² Universidade da Coruña, Centro de Investigaciones Científicas Avanzadas (CICA), Facultad de Ciencias, A Coruña, España.. aitor.garcia.tomillo@udc.es, izabelarcaraujo@gmail.com, douglas_ibf@hotmail.com

³ Centro de Investigação de Montanha (CIMO), Instituto Politécnico de Bragança (ESA/IPB), Campus de Santa Apolonia, 5301-855 Bragança, Portugal. tomasfig@ipb.pt, ffonseca@ipb.pt.

⁴Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho” (UNESP), Brasil. rayner_sb@hotmail.com, montanari@agr.feis.unesp.br

⁵Associação Portuguesa de Tracção Animal, Bragança, Portugal. joaobrandaoarodrigues@gmail.com

⁶Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Paraná, Brasil. rodrigojovargas@hotmail.com

⁷Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB), Brasil. oldair@ufrb.edu.br

Palabras Clave: Tracción mecanizada, Tracción animal, Tomografía de Resistividad Eléctrica, Propiedades físicas del suelo.

RESUMEN. El laboreo del suelo mediante tracción motorizada (TM) puede resultar excepcionalmente más complicado que con tracción animal (TA) en pequeñas áreas rurales o de montaña; si bien no existen muchos trabajos sobre el impacto de TA en el suelo. El objetivo del estudio fue comprobar experimentalmente si mediante la Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE) es posible observar diferencias en el estado físico del suelo laboreado en función de la tracción utilizada. Se aplicaron 3 tratamientos con un caballo y un tractor: Arado; Arado + Cultivador y Cultivador. Los resultados de la TRE permiten detectar diferencias antes y después del laboreo para ambos tipos de tracción con un aumento de la resistividad eléctrica (RE) de un 35% para la TA y de 24% para la TM a la profundidad 0,0-0,1 m, mientras que a la profundidad 0,1-0,2 m la RE se mantuvo prácticamente constante en la TA (-1%), disminuyendo un 24% en la TM.

ABSTRACT. Soil tillage by motorized traction (TM) can be less feasible than by animal traction (TA) in small rural or mountain areas; although there are not many studies assessing the impact on soils caused by TA. This study aimed at assessing the performance of Electrical Resistivity Tomography (ERT) in detecting differences in tillage impacts on soils depending on the traction type used in tillage operations. Implements selected for the experiment were Plow, Plow + Cultivator and Cultivator, pulled by a draft horse and a tractor. ERT results showed differences before and after tilling. The electrical resistivity (ER) increased 35% for TA and 24% for TM at 0.0-0.1 m soil depth. At 0.1-0.2 m depth, ER remained almost constant for TA (-1%), while decreasing 24% when before and after tilling measurements are compared for TM.

1.- Introducción

El creciente uso del monocultivo así como la utilización de maquinaria agrícola provocan un aumento en la degradación del suelo agrícola (Martins y Fernandes, 2017; Bucella, 2015). La crisis ecológica mundial revela importantes impactos en los países agrícolas desarrollados y por ello se están retomando ciertas prácticas agrícolas que parecían ya olvidadas (Ayache, 2011). El riesgo de agotamiento y degradación de recursos (agua y suelo) debido a la intensificación agrícola ha llevado a agricultores y silvicultores a *redescubrir* el valor de la tracción animal con vistas a la reducción del consumo de energía fósil y como estímulo a procesos favorables al medio ambiente (Santos, 2019). Este *redescubrimiento*, en ciertos casos consigue remediar parte de los daños ya ocasionados (Merino, 2013).

La tracción animal es una práctica agrícola que puede contribuir de manera importante a la agricultura sostenible, especialmente en pequeñas explotaciones agropecuarias y en la agricultura de montaña. Debido a ello, en Europa, el número de pequeñas y medianas explotaciones agrícolas (y forestales) que han empezado a utilizar la tracción animal habitualmente está creciendo (Rodrigues et al. 2017). Los estudios realizados indican que tanto en términos de gasto energético (Herold et al. 2014), eficiencia de tracción (Johansson et al. 2013) y en el uso de energías renovables (Jansén 2000); la utilización de animales de tiro se muestra como una alternativa totalmente fiable.

El continuo uso de implementos de labranza, especialmente los arados y rastras de discos, los arados de vertedera, entre otros, puede afectar de manera negativa al suelo degradándolo; provocando procesos erosivos y también compactándolo. La compactación, que provoca la rotura de los macroporos, afecta tanto a la emergencia de la semilla como, al desarrollo radicular o a la infiltración de agua y por lo tanto impide una nutrición adecuada de los cultivos. La degradación de la estructura del suelo mediante el uso de tracción animal podría ser menor que la provocada por la tracción mecanizada, dado que los

animales tienen un peso menor y además su velocidad de desplazamiento también es menor.

La compactación, a diferencia de la erosión, no se revela superficialmente; puesto que ocurre de manera sub-superficial, haciéndose todavía necesario para identificación de análisis de las propiedades físicas del suelo.

La Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE) es un método geofísico no invasivo aplicado en estudios de la variabilidad espacial y temporal del suelo que también ha sido utilizado para estudiar cómo afecta el laboreo a las propiedades físicas del suelo (Rossi et al., 2013; Besson et al., 2013). Según Friedman (2005), dos de los factores que afectan al valor de la resistividad eléctrica (RE) son la porosidad y contenido de agua del suelo. La corriente pasa por los poros rellenos de agua y por la superficie de las partículas de arcilla, por lo que la RE dependerá en cierta medida de la densidad aparente del suelo y de forma más general la estructura del mismo (Basso et al., 2010).

El objetivo del presente trabajo fue evaluar si es posible mediante la Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE) encontrar diferencias en el estado físico del suelo labrado por diferentes implementos agrícolas arrastrados mediante tracción animal y mecanizada en una parcela de ensayo. Para ello, se midieron propiedades físicas del suelo como la densidad aparente, porosidad y conductividad hidráulica saturada del suelo.

2.- Material y Métodos

2.1 Área de Estudio

El ensayo se instaló en la Quinta do Poulão de la Escuela Superior Agraria, Instituto Politécnico de Bragança, Portugal (41°46'49.53''N 6°47'57.50''O). El clima de Bragança presenta tanto influencias continentales como atlánticas (Agroconsultores e Coba, 1991). La temperatura media y precipitación anual acumulada (en el periodo 1981-2010) es respectivamente, 12,7°C e 773 mm (IPMA, 2019). El suelo estudiado es un Fluvisol Éutrico de deposiciones aluviales (IUSS Working Group WRB, 2014) de textura franca y contenidos de arcilla, arena y limo de 21%, 54% e 25%, respectivamente. El área estudiada fue dividida en 3 parcelas de 120 m² (20 x 6 m) y éstas a su vez en sub-parcelas de 60 m² (20 x 3 m) (Figura 1).

El experimento se llevó a cabo los días 26 y 27 de enero de 2018. El campo experimental se encontraba cubierto de rastrojo parcialmente descompuesto de maíz para ensilado, el cual había sido cosechado 3 meses antes.

2.2 Tratamientos

Se analizaron los siguientes factores: Tipo de implemento (arado; cultivador; arado + cultivador) y tipo de tracción (animal y motorizada). Los tratamientos estudiados fueron: Tracción animal + Arado (Tratamiento 1); Tracción animal + Cultivador (Tratamiento 2); Tracción animal + Arado + Cultivador (Tratamiento 3); Tracción motorizada + Arado (Tratamiento 4); Tracción motorizada + Cultivador (Tratamiento 5); Tracción motorizada + Arado + Cultivador

(Tratamiento 6) (Figura2). Cada tratamiento consistió en el paso del implemento a lo largo de la sub-parcela. El tractor utilizado fue un John Deere 5620 de 3.549 kg, con una potencia nominal del motor de 53,7 kW, neumático delantero con una anchura de 142 a 192 cm y neumático trasero de 141 a 191 cm. La tracción animal fue llevada a cabo por una yegua da raza Ardennais (*Equus ferus caballus*) (Figura 2) de 800 Kg de peso vivo. El arado utilizado para la tracción motorizada fue un arado de vertedera de 550 kg, modelo RV de 6 rejas, con una amplitud de trabajo de 2 m y el cultivador fue un Vibrocultor Herculano, modelo RHV 210 con 27 dientes en 4 planos verticales, de anchura de trabajo de 2,70 m. En tracción animal se utilizó un arado Brabant de una reja, de ancho de trabajo de 1 m y el cultivador por su parte de modelo canadiense de 9 dientes y anchura de trabajo 1,5 m. Se utilizó una profundidad de trabajo de 0,2 m tanto para las labores con tracción mecanizada como con tracción animal.

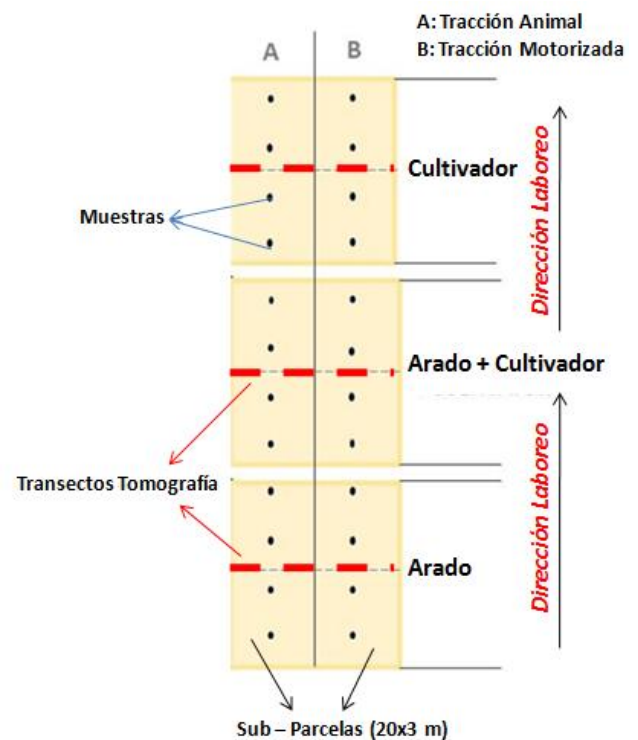


Fig. 1. Esquema del experimento de campo. Tratamientos, puntos de muestreo y transectos de TER

2.3 Muestras de Suelo

En cada sub-parcela se localizaron 4 puntos de muestreo, confeccionando una malla de 24 puntos en el área de estudio (Figura 1). En cada punto se tomaron muestras antes y después del manejo de suelo mediante tracción animal/motorizada. En cada punto se obtuvieron 3 muestras inalteradas a las profundidades 0-0,05, 0,05-0,1, y 0,1-0,2 m. En la primera profundidad se llevaron a cabo determinaciones de conductividad hidráulica saturada del suelo (Ks), densidad aparente (Da), porosidad total (P), microporosidad (MicroP) y macroporosidad

(MacroP). P y MicroP se calcularán con la Da y la Humedad determinada en las muestras, respectivamente, saturadas y drenadas por 24h; la MacroP se obtuvo por diferencia entre P y MicroP. En la segunda y tercera profundidad se determinó también la Da. Los anillos volumétricos utilizados para obtener las muestras inalteradas tienen un volumen de 100 cm³. Para obtener la Ks se colocaron los cilindros en el permeámetro de carga constante (carga hidráulica media de 2,4 cm) y circuito cerrado de acuerdo a la fórmula (Hillel, 1998):

$$K = \frac{V * L}{A * t * h} \quad (1)$$

Siendo:

K-Coeficiente de permeabilidad

V-Volumen de agua obtenido en la bureta

L-Longitud del cilindro.

A-Área de la superficie del cilindro.

t- Tiempo en obtener la medida de volumen V.

h-Diferencia del nivel del agua dentro y fuera del cilindro (en el permeámetro).



Fig. 2. Medios de tracción e implementos utilizados en el experimento: Tractor (A); Yegua Raza Ardennais (B); Vibrocultor (C); Arado modelo Brabant (D); Arado de Vertedera (E); Cultivador modelo canadiense (F).

2.4 Tomografía de Resistividad Eléctrica

Las medidas se llevaron a cabo en 3 transectos que atravesaban cada parcela (Figura 1), perpendicularmente a la dirección del laboreo; realizándose una medición previamente al laboreo y otra medición inmediatamente después de terminado el mismo, por lo tanto con un total de 6 transectos de TRE. El equipo utilizado fue un Terrameter SAS 1000 (ABEM), con un selector de electrodos ES 10-64; la separación de los 40 electrodos metálicos fue de 0,10 m, con apertura de alas de 4 m (Figura 3).



Fig. 3. Disposición del equipo de TRE en la parcela objeto de estudio.

Los datos de resistividad eléctrica aparente de las mediciones se invirtieron mediante el software RES2DINV para obtener un modelo 2D de los datos de resistividad real. El protocolo escogido para las mediciones, Wenner 32SX, es el apropiado para el estudio de estructuras horizontales (Loke, 2011; Samouëlian et al., 2005). Se utilizaron para el estudio estadístico los valores de RE obtenidos en los puntos del protocolo Wenner 32 SX comprendidos entre 0 y 0,2 m; puesto que a partir de esa profundidad no se observa diferencias notables entre la RE medida antes y después del laboreo.

3.- Resultados y Discusión.

Santos (2019) observó que antes de realizar el laboreo, no se registran diferencias significativas de las propiedades estudiadas en el área experimental (por tratamientos); lo que confirma que el área estudiada puede considerarse uniforme. Los valores medios de las propiedades físicas estudiadas de las muestras de suelo obtenidas antes y después del laboreo en función del tipo de tracción utilizada se muestran en la Tabla 1.

Santos (2019) concluyó además que no hubo diferencias estadísticamente significativas según los tipos de tracción empleados para las diferentes propiedades estudiadas; salvo en el caso de la macroporosidad donde su disminución fue más acentuada en el caso de la tracción animal (33% frente a 3% en tracción motorizada), es decir que el área donde se utilizó la tracción animal presenta después de las labores un número de macroporos menor que el área donde fue utilizada la tracción mecanizada.

Tabla 1. Propiedades físicas estudiadas antes y después del laboreo en función de la tracción utilizada (T.A. - Tracción Animal y T.M - Tracción motorizada). Ks=Conductividad hidráulica saturada del suelo.

Propiedad	Uds	Antes		Después	
		TA	TM	TA	TM
Ks	cm/h	348,24	307,73	772,83	624,45
Densidad aparente	g/cm ³	1,40	1,38	1,23	1,19
Porosidad Total	%	47,23	47,77	47,46	49,38
Macroporosidad	%	3,43	3,18	2,29	2,99

En cuanto a la Resistividad Eléctrica (RE), se cumple que en los 3 tratamientos elegidos en función del implemento, a las profundidades 0 - 0,05 y 0,5 - 0,1 m la RE aumenta tanto para la tracción motorizada (presentando una variación relativa de 36,2 y 28,5 % respectivamente) como para la tracción animal (con una variación relativa de 55,1 y 51,8 % respectivamente) (Tabla 2). Esto es achacable a la aireación que experimenta el suelo después del laboreo, mayor cantidad de aire dificulta el paso de la corriente eléctrica y aumenta la RE. Estas diferencias pueden explicarse porque la labor realizada mediante tracción motorizada, consigue una menor aireación de terreno (al voltear el suelo) al formar agregados de mayor tamaño, y por lo tanto menos disgregados que los formados por la tracción animal. Además, al realizar la tracción animal un menor volteo causa un menor impacto a la estructura del suelo (Bertol et al. 2000). Por el contrario, en la profundidad 0,10-0,20 m la RE en el área donde se utilizó la tracción animal se mantiene prácticamente sin variación (-1.2%) mientras que la RE en el área de la tracción motorizada se reduce en casi un 20 % (Tabla2). La mayor fuerza que ejerce la tracción mecanizada y la mayor masa del tractor respecto al animal, causan compactación a esta profundidad (menor cantidad de aire y por tanto menor RE) mientras que la tracción animal (debido a la su menor peso y fuerza que ejerce) provoca un menor impacto en profundidad, no observándose efectos en la variación de la RE a más de 0,10 m (Tabla 2). Además, los aperos utilizados en tracción animal no comprimen tanto el suelo durante las operaciones de manejo como ocurre con la tracción motorizada lo que puede ayudar a preservar las propiedades físicas del suelo de una manera adecuada (Bertol, et al. 2000).

Tabla 2. Valores de RE por profundidad antes y después del laboreo en función de la tracción utilizada (T.A. - Tracción Animal y T.M - Tracción motorizada)

Profundidad (m)	Antes (Ω·m)		Después (Ω·m)		Variación (%)	
	TA	TM	TA	TM	TA	TM
0-0,05	90,8	94,4	140,9	128,7	55,1	36,2
0,05-0,1	106,5	115,0	161,7	147,8	51,8	28,5
0,1-0,2	210,5	228,5	207,9	183,6	-1,2	-19,7

Las medias de RE antes y después del laboreo en función de los aperos utilizado para llevarlo a cabo (arrastrados por tracción mecánica y animal) se muestran en la Tabla 3. Se observa que el tándem formado por Arado + Cultivador es que mayor efecto tiene en la RE en los primeros 0,10 m del suelo mientras que en el área de terreno donde se utilizó el cultivador en solitario este efecto es mucho menor, debido a que este apero realiza una labor menos intensa que el arado.

Tabla 3. RE por profundidad antes y después del laboreo (tracción mecanizada y animal) en función del apero utilizado (A - Arado, A+C - Arado y Cultivador, C - Cultivador)

Prof. (m)	Antes (Ω·m)			Después (Ω·m)		
	A	A+C	C	A	A+C	C
0-0,05	85,0	94,9	97,9	140,1	158,3	105,8
0,05-0,1	115,4	110,0	106,9	171,7	179,8	112,8
0,1-0,2	220,6	273,8	164,2	207,1	236,8	143,4

El arado y el arado + cultivador provocan un aumento en la variación relativa de la RE a las profundidades 0-0,05 y 0,05 - 0,10 m (Figura 4). El caso de la TA aumenta un 76,9% en la capa más superficial y un 78% a la profundidad 0,05-0,10 mientras que la TM causa un aumento de un 78% y un 77% a 0,0-0,05 y 0,05-0,1 m respectivamente.

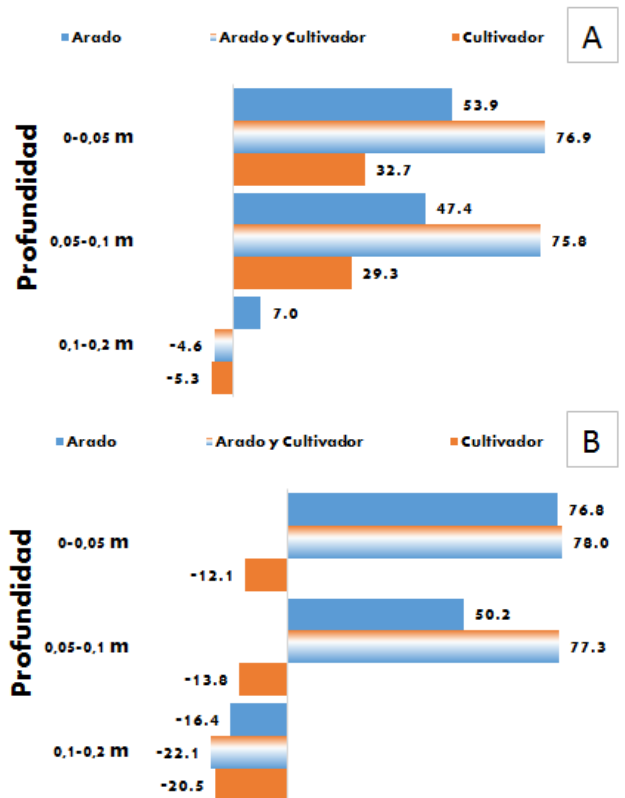


Fig. 4. Variación relativa de la RE (%) a diferentes profundidades del suelo inducida por el efecto de los aperos utilizados en el estudio. 4A - Tracción Animal y 4B - Tracción motorizada.

En la Figura 5 se muestran los perfiles de suelo obtenidos invirtiendo los datos de RE para la sub-parcela Arado + Cultivador antes y después de la movilización del terreno. Puede observarse como la tracción motorizada ha tenido efecto en la RE a mayor profundidad (hasta 0,2 m) que la que ha podido alcanzar la tracción animal, cuyo efecto más destacable se sitúa en la capa 0-0,10 m.

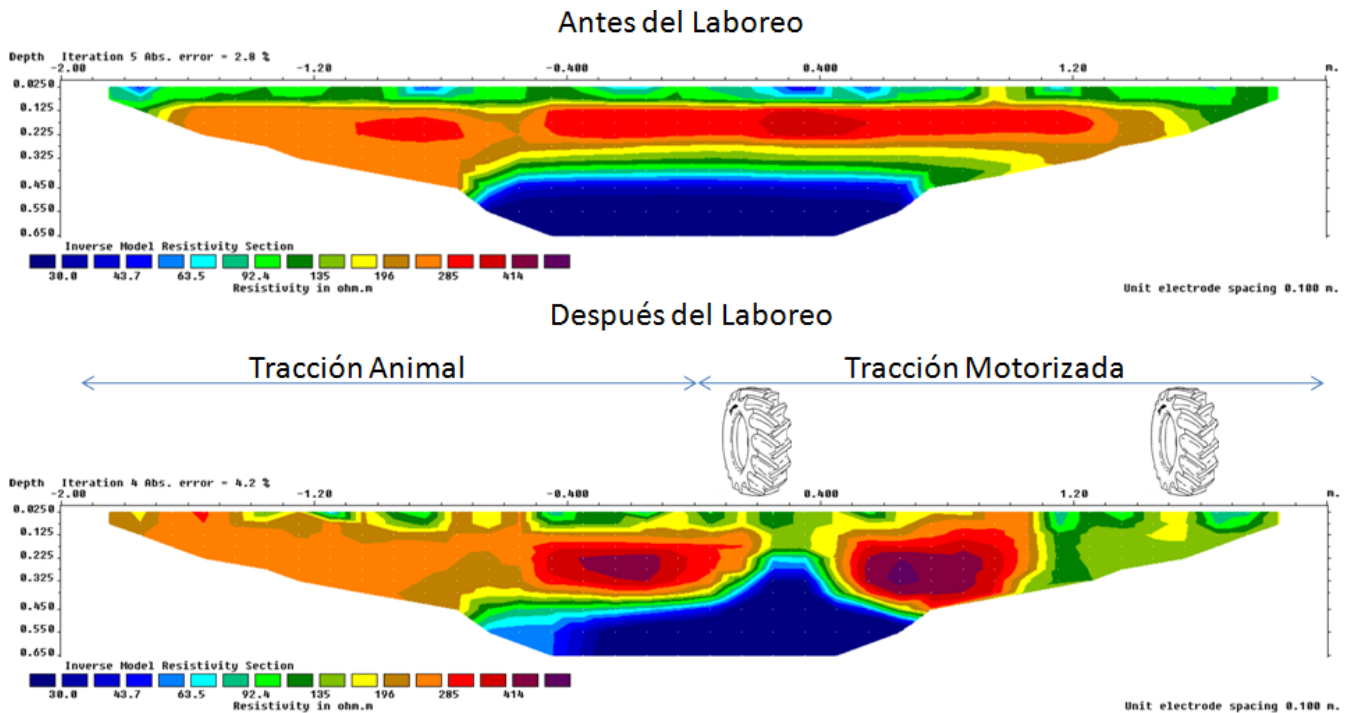


Fig. 5. Perfiles del modelo inverso de la RE obtenidos con el RES2DINV para antes y después del laboreo en la sub-parcela Arado + Cultivado.

4.- Conclusiones

El estudio experimental puso de manifiesto los impactos sobre las propiedades físicas del suelo debido al uso de diferentes aperos arrastrados por tracción animal o motorizada; mostrando diferencias en profundidad en función del tipo de tracción (efecto más superficial la tracción animal). Comparando entre los aperos utilizados, Cultivador, Arado y Arado + Cultivador fue el primero el que menor impacto causó en el suelo. La TRE mostró un elevado potencial para detectar dichos impactos, mostrando gran eficacia en diferenciar las alteraciones estructurales del suelo a escasa profundidad que los métodos tradicionales de análisis de las propiedades físicas del suelo no pudieron poner de manifiesto con tanta evidencia.

5.- Bibliografía

Agroconsultores e Caba, 1991. Carta do Solos, Carta do uso Actual da Terra Carta da adaptação da Terra do Nordeste de Portugal. Universidade de Trás-as-Montes e Alto Douro.

Ayache, S., 2011. Energie animale et gestions des espaces naturels. Conservatoire Rhône d'Alpes des Espaces Naturels et ONF, France, 19 p.

Basso B., M. Amato, G. Bitella, R. Rossi, A. Kravchenko, L. Sartori, L. M. Carvahlo y J. Gomes, 2010. Two-Dimensional Spatial and Temporal Variation of Soil Physical Properties in Tillage Systems Using Electrical Resistivity Tomography. *Agron. J.*, 102(2),440-449.

Bertol, I. O. Ciprandi, L. Campos, Nicanor Gomes de y O. Batistela, 2000. Propriedades físicas e químicas e produtividade de milho afetadas pelo manejo do solo com tração animal, numa terra bruna estruturada. *Ciência Rural*, 30(6), 971-976.

Besson, A., M. Séger, G. Giot y I. Cousin, 2013. Identifying the characteristic scales of soil structural recovery after compaction from three in-field methods of monitoring. *Geoderma*, 204-205, 130-139.

Bucella, P. 2015. Uso sustentável da terra na União Europeia. En *Cultivar: Cadernos de Análise e Prospetiva*, 2, 13-20.

Friedman S.P. 2005. Soil properties influencing apparent electrical

conductivity: A review. *Comput. Electron. Agr.* 46, 45-70.

Herold P., P. Schlechter, y R. Scharnhözl, 2014. Modern use of horses *Horses%20in%20organic%20farming.pdf* in organic farming, FECTU, 2014. www.fectu.org/English/.

Hillel, D. 1998. *Environmental Soil Physics: Fundamentals, Applications, and Environmental Considerations*. Academic Press.

IPMA, 2019. Normais Climatológicas de Bragança (1981-2010). Instituto Português do Mar e da Atmosfera, Lisboa (<http://www.ipma.pt/pt/oclima/normais.clima/>)

IUSS Working Group WRB, 2014. World reference base for soil resources 2014: International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World soil resources reports No. 106. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.

Jansén J., 2000. Agriculture, Energy and Sustainability. Case studies of a local farming community in Sweden, *Acta Universitatis Agriculturae Sueciae – Agraria*, 253, 34-39.

Johansson S., K. Belfrage, y M. Olsson., 2013. Impact on food productivity by fossil fuel independence – a case study of a Swedish small-scale integrated organic farm, *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B - Soil & Plant Science* 63, 123-135.

Loke, M. H. 2011. Tutorial : 2-D and 3-D electrical imaging surveys. Disponible en: www.geoelectrical.com.

Martins, J.C., y R. Fernandes, 2017. Processos de degradação do solo - medidas de prevenção. *Vida Rural*, 34-36.

Merino, A., 2013. Runoff Erosion and Human Societies. En: *Run off erosion* (Evelpidou, N. et al, pp. 172-229).

Rodrigues, J.B., P. Schlechter, H. Spychiger, R. Spinelli, N.Oliveira, y T.Figueiredo, 2017. As montanhas do século XXI: manejo sustentável de áreas montanhosas baseadas na tração animal. *Open Agriculture* 2, 300-37.

Rossi, R., M. Amato, G. Bitella y R. Bochicchio, 2013. Electrical resistivity tomography to delineate greenhouse soil variability. *Int. Agrophys.* 13 (27), 211-218.

Samouëlian, A., I. Cousin, A. Tabbagh, A. Bruand y G. Richard, 2005. Electrical resistivity survey in soil science: a review. *Soil Till Res.* 83, 173-193.

Santos, R.V. dos, 2019. Efeito de mobilizações com tração animal nas propriedades físicas do solo. Tesis de Maestría en Agroecología, Escola Superior Agrária, Instituto Politécnico de Bragança. Portugal