

## EVALUACIÓN DE LA SIEMBRA DIRECTA COMO MANEJO ALTERNATIVO PARA LA MEJORA DE LA CONDICIÓN FÍSICA DE SUELOS AGRÍCOLAS A TRAVÉS DEL ANÁLISIS DE CURVAS DE RETENCIÓN DE AGUA

A. Aldaz-Lusarreta<sup>1,2\*</sup>, R. Giménez<sup>1,2</sup>, M.A. Campo-Bescós<sup>1,2</sup>, I. Virto<sup>1,3</sup>, L.M. Arregui<sup>1,4</sup> y M. Otazu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Innovación y Sostenibilidad en la Cadena Agroalimentaria (IS-FOOD), Universidad Pública de Navarra (UPNA), Campus de Arrosadía, 31006 Pamplona, España.

<sup>2</sup>Departamento de Ingeniería, Ed. Los Olivos, Universidad Pública de Navarra (UPNA), Campus de Arrosadía, 31006 Pamplona, España.

<sup>3</sup>Departamento de Ciencias, Ed. Los Olivos, Universidad Pública de Navarra (UPNA), Campus de Arrosadía, 31006 Pamplona, España.

<sup>4</sup>Departamento de Agronomía, Biotecnología y Alimentación, Ed. Los Olivos, Universidad Pública de Navarra (UPNA), Campus de Arrosadía, 31006 Pamplona, España.

\*A. Aldaz-Lusarreta. alaitz.aldaz@unavarra.es

**RESUMEN.** En este trabajo se evalúa la siembra directa como alternativa al laboreo convencional en un suelo típico de Navarra, a partir del análisis de curvas de retención de humedad (CRH).

Se seleccionaron dos parcelas idénticas en tipo y uso del suelo, pero contrastantes en su manejo: (i) siembra directa (18 años continuos) tras laboreo convencional y (ii) laboreo convencional. En ambos tratamientos se tomaron muestras inalteradas de suelo (0-5 cm). Y de éstas, se obtuvieron en laboratorio sendas CRH mediante el dispositivo Hyprop. Para cada CRH se determinó el índice S de Dexter.

El índice S no presentó diferencias significativas entre ambos tratamientos. Sin embargo, las CRH mostraron importantes diferencias entre los tratamientos en cuanto a la distribución del tamaño de poros. El suelo bajo laboreo presentó mayor macroporosidad (agua gravitante). Por tanto, el suelo (horizonte superficial) bajo siembra directa podría almacenar hasta un 10 % más de agua para el cultivo.

**ABSTRACT.** This work evaluates no-tillage as an alternative to conventional tillage in a typical soil of Navarre (Spain), based on the analysis of soil water retention curves (SWRC).

Two plots were selected, identical in soil type and use, but contrasting in their management: (i) no-tillage (18 continuous years) after conventional tillage and (ii) conventional tillage. In both treatments, undisturbed soil samples were taken (0-5 cm). From these, SWRCs were obtained in the laboratory using the Hyprop device. Dexter's S index was determined for each SWRC.

The S index did not show significant differences between the two treatments. However, the SWRCs present significant differences between treatments regarding pore size distribution. The tilled soil showed higher macroporosity (gravitational water). Therefore, the soil (surface horizon) under no-tillage could store ca. 10 % more water for the crop.

aireación y compactación (Hamza y Anderson, 2005; Pagliai et al., 2004). Todos estos síntomas tienen básicamente una causa común: el deterioro de la estructura natural del suelo que conlleva cambios en su porosidad y las propiedades hidráulicas (Pires et al., 2017; Kodešová et al., 2011).

Las prácticas de conservación, que implican reducir o suprimir el laboreo, como la siembra directa, preservan la estructura del suelo (Islam y Reeder, 2014; Triplett y Dick, 2008; Bescansa et al., 2006) y por tanto, la porosidad asociada a la misma.

Inferir los cambios en la estructura del suelo a través de la distribución del tamaño de poro es una estrategia ampliamente documentada. Entre los métodos más utilizados para la caracterización de los poros está el análisis de imagen (Pires et al., 2013; Taina et al., 2010; Pagliai et al., 2004). La principal limitación de esta técnica es que no es posible asegurar la *conectividad* entre los poros. Sin embargo, sí se puede estudiar adecuadamente dicha conectividad mediante el uso de las curvas de retención de humedad (CRH) ya que únicamente actúan con los poros funcionales.

Las CRH son funciones que relacionan el contenido de agua en el suelo y el grado de retención/succión de la misma por la matriz edáfica. El grado de retención está relacionado, en gran medida, con el sistema poroso (tamaño de poro) del suelo, por lo que las CRH constituyen una valiosa herramienta de diagnóstico del estado físico del suelo (Pires et al., 2017; Dexter, 2004a,b).

La CRH de la mayoría de los suelos presenta una *forma de J*, definida por la presencia de la denominada *zona de entrada de aire*, en la cual el contenido de humedad volumétrico se mantiene en valores de saturación aún en succiones ligeramente superiores a cero. Esto es debido a la presencia de poros ocluidos (no funcionales) (Dane y Clarke, 2002). En cambio, en ausencia de una (marcada) zona de entrada de aire la CRH adopta una forma que asemeja una S.

A partir de un suelo completamente saturado el valor de la succión en el que el suelo comienza a desaturarse se define como el *valor de entrada de aire*. A partir de este punto, el contenido de agua en el suelo, por tanto, disminuye a medida que aumentan los valores de succión; identificándose en la curva un punto de inflexión. En el caso de los suelos de textura fina y no alterados, las CRH

### 1.- Introducción

La degradación del suelo por el excesivo laboreo se manifiesta de diferentes maneras: decrecimiento de la tasa de infiltración y de almacenamiento de agua, pobre

presentan frecuentemente una *forma de S* (Dane y Clarke, 2002).

De acuerdo a lo establecido por Brooks y Corey (1964), en las CRH con *forma de J* el ajuste de la curva se realiza con una función exponencial. Sin embargo, para las curvas con *forma de S* las funciones exponenciales tienen un ajuste relativamente pobre (Milly, 1987; van Genuchten y Nielsen, 1985), siendo necesario el empleo de funciones de tipo sigmoidal, como por ejemplo la ecuación de van Genuchten (1980).

Dexter (2004) propuso un índice S de estimación del estado físico del suelo (cambios en la porosidad y por tanto en la estructura del suelo) obtenido a partir de las CRH (ver abajo). Este índice S hace referencia al valor de la pendiente en el punto de inflexión de la CRH (Dexter, 2004a,b). Según Dexter (2004), este punto de inflexión define el límite entre los poros estructurales (en el rango de baja succión) y los poros texturales (en el rango de alta succión).

Cuanto mayor sea el número de puntos de medición en una CRH (contenido de humedad vs succión) más preciso sería el ajuste de funciones matemáticas (ej., van Genuchten, 1980) a partir de las cuales se pueden determinar los correspondientes puntos de inflexión (=Índice S), también, con mayor certeza.

Es posible obtener en laboratorio CRH detalladas a partir de muestras de suelo mediante el uso del dispositivo Hyprop comercializado por METER (München, Alemania) (Schindler et al., 2010).

El objetivo del presente trabajo es evaluar la siembra directa como manejo alternativo para la mejora de la condición física del suelo respecto al manejo convencional en un suelo agrícola característico de la zona central de Navarra, a través, principalmente, del índice S (Dexter, 2004) obtenido a partir de curvas de retención de humedad.

Se evaluará el efecto a largo plazo (aproximadamente dos décadas) de la siembra directa en el suelo de estudio, con antecedentes de laboreo convencional durante décadas, a través del análisis de CRHs de muestras inalteradas de suelo obtenidas en laboratorio con el uso del dispositivo Hyprop. Los resultados serán contrastados con el mismo suelo bajo laboreo convencional. A continuación, se presentan los primeros resultados de esta investigación

## 2.- Material y métodos

### 2.1. Sitio de estudio y tratamientos

Se seleccionaron dos parcelas agrícolas contiguas en el municipio de Garinoain (Navarra) idénticas en cuanto a tipo de suelo (*Typic Calcixerept*, textura franca, USDA, Tabla 1) y uso del mismo (cereal de secano), pero contrastantes en cuanto a manejo/laboreo: a) siembra directa (18 años continuos) tras laboreo convencional (de ahora en más siembra directa) y b) laboreo convencional continuo con chisel (parcela control).

Se recogieron al azar tres muestras inalteradas (n= 3) (en cilindros, diámetro: 8 cm, altura: 5 cm) de ambos tratamientos (siembra directa y laboreo convencional) de los primeros 5 cm de profundidad.

**Tabla 1.** Propiedades físico-químicas en los suelos (0-5 cm) de los dos tratamientos (siembra directa y laboreo convencional) utilizados en la experimentación.

|                                | Siembra directa      | Laboreo convencional |
|--------------------------------|----------------------|----------------------|
| Arena (Gruesa) (%)             | 5,34                 | 7,64                 |
| Arena (Fina) (%)               | 28,43                | 26,13                |
| Limo (%)                       | 50,64                | 52,25                |
| Arcilla (%)                    | 15,59                | 13,98                |
| Textura (USDA)                 | <i>Franco limoso</i> | <i>Franco limoso</i> |
| Densidad (g·cm <sup>-3</sup> ) | 1,26                 | 1,26                 |
| pH                             | 8,20                 | 8,20                 |
| CE (µS·cm <sup>-1</sup> )      | 483,00               | 795,00               |
| C orgánico (%)                 | 1,80                 | 1,51                 |
| Carbonatos (%)                 | 31,64                | 32,51                |
| CIC (Cmol·Kg <sup>-1</sup> )   | 1,11                 | 0,98                 |

### 2.2. Experimentación

En el último mes del periodo húmedo en la zona (febrero), y aproximadamente 4 meses después de la última labor del suelo en manejo convencional, se extrajeron muestras inalteradas de suelo –mediante la utilización de cilindros de acero inoxidable de 8 cm y 5 cm de diámetro y altura, respectivamente–. A partir de estas muestras inalteradas de las parcelas de siembra directa y laboreo convencional, se obtuvieron sendas CRH mediante el equipo Hyprop.

Tras saturar las muestras de suelo, se prepararon según se indica a continuación.

El dispositivo Hyprop utiliza el método de evaporación simplificado de Peters y Durner (2008) y Schindler (1980). El procedimiento, se basa en la medida en continuo del potencial hídrico mediante la inserción en la muestra de suelo saturada de 2 micro-tensiómetros, mientras el contenido de humedad de la muestra se va reduciendo progresivamente por evaporación. Es decir, a medida que avanza la experimentación, la muestra va perdiendo agua por evaporación y los tensiómetros registran la variación de succión al mismo tiempo que una balanza mide la variación de peso. Los registros de succión y de peso se hacen de forma automática y continua. De esta manera, es posible obtener la relación entre el contenido gravimétrico y volumétrico de agua a partir de lecturas de peso y la densidad aparente de la muestra, y el contenido de humedad (Schindler et al., 2010).

Tras concluir las mediciones del ensayo con el Hyprop, se secaron las muestras en estufa a 105 °C durante 24 h, para determinar el peso seco y la densidad aparente del suelo, y poder realizar la evaluación de los resultados en el software Hyprop-Fit. El programa automáticamente calcula la curva de retención de humedad del suelo a partir del peso seco.

### 2.3. Determinación del índice S

El índice S se determinó según se describe en Dexter (2004 a). Este índice S representa el valor de la pendiente de la CRH en el punto de inflexión cuando la curva se expresa como logaritmo natural de la succión (en hPa)

frente al contenido de humedad gravimétrico,  $\theta_g$  ( $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) (Dexter, 2004a, b). A mayor valor de  $S$ , mayor presencia de poros estructurales y, por tanto, menor degradación (Dexter, 2004a).

Es posible determinar el valor de la pendiente manualmente a partir de la CRH, siempre que se disponga de varios puntos de medición, o bien a través del ajuste de la curva a una función matemática y calculando la pendiente en el punto de inflexión. La ecuación más extendida, utilizada por la mayoría de los modelos matemáticos en este ámbito, es la ecuación de van Genuchten (1980) (Dexter, 2004 a).

Así pues, teniendo en cuenta las recomendaciones de los diferentes autores (ver arriba), para el cálculo del “valor  $S$ ” se utilizaron los parámetros ajustados de la ecuación de van Genuchten (1980). Además, se calculó el valor de la pendiente ( $S$ ) a través de una segunda ecuación sigmoideal (Ec. (1)).

$$y = a / 1 + e^{-(x-x_0/b)} \quad (1)$$

donde

$y$  = Logaritmo de la succión (hPa)  
 $x$  = Humedad gravimétrica ( $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )  
 $a, b, x_0$  = Parámetros de la ecuación

El dispositivo Hyprop, además de la CRH, proporciona la Curva de Conductividad Hidráulica No Saturada (CHNS), a partir de la cual es posible calcular el punto de capacidad de campo experimental. Cuando tras haberse saturado el suelo, el contenido de agua alcanza un valor relativamente estable, es decir, los macroporos dejan de drenar, el agua retenida corresponde a la que ocupa los poros con una succión suficiente para retener el agua disponible para las plantas. En ese momento, la conductividad hidráulica del suelo corresponde a la fase no saturada. Esto hace que la pendiente de la curva cambie bruscamente, formándose un punto de inflexión. La retención de agua en este punto de inflexión se conoce como punto de capacidad de campo experimental (Fontanet, 2014).

Finalmente, se estimó la distribución de tamaños de poro a partir de los valores de succión de las CRH utilizando la siguiente ecuación (Ec. (2)) (Brady y Weil, 2008):

$$h = 2 T \cos \theta / \rho g r \quad (2)$$

donde

$h$  = Elevación del líquido (m)  
 $T$  = Tensión superficial (N/m)  
 $\theta$  = Ángulo de contacto del líquido  
 $\rho$  = Densidad del líquido ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )  
 $g$  = Aceleración gravitacional ( $\text{m}/\text{s}^2$ )  
 $r$  = radio (m)

### 3.- Resultados y discusión

El análisis físico-químico de los suelos (Tabla 1) –junto a la inspección visual realizada in situ– corrobora la homogeneidad del suelo de estudio en las diferentes zonas,

en lo relativo a las propiedades físico-químicas relacionadas con la retención de agua, excepto el contenido de  $C$  orgánico, asociado al cambio de manejo. Esto permite considerar las diferencias que a continuación se destacan como asociadas, principalmente, al diferente manejo del suelo (siembra directa vs laboreo convencional).

#### 3.1. Curvas de retención de humedad

En la Fig. 1 se presentan las CRH obtenidas con el dispositivo Hyprop para cada una de las repeticiones de siembra directa y laboreo convencional.

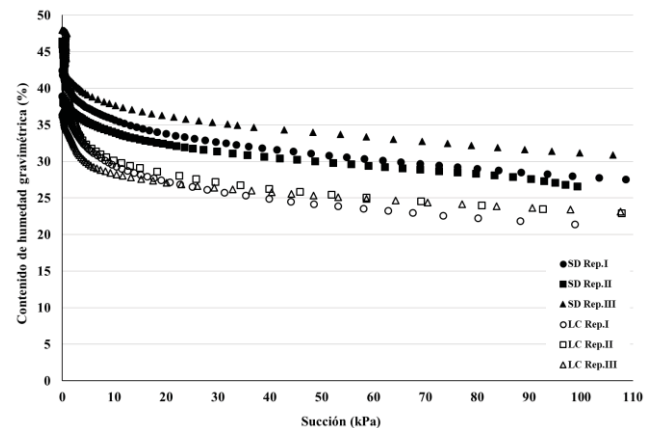


Fig. 1. Curvas de retención de humedad de cada repetición ( $n=3$ ) de los dos suelos de estudio (siembra directa (SD) y laboreo convencional (LC)).

Se observa una clara diferencia entre las CRH de los dos tratamientos: la variabilidad entre tratamientos fue marcadamente superior a la existente entre las repeticiones (Fig. 1).

El contenido de humedad en saturación en ambos tratamientos fue similar (Fig. 1; ver valores de densidad aparente en Tabla 1), lo que indicaría que no hubo una compactación significativa –y por tanto, reducción del espacio poroso total– como consecuencia del laboreo. Por otro lado, no se infiere presencia significativa de poros ocluidos o no funcionales (la zona de entrada de aire es despreciable, Fig. 1) en ambos tratamientos; esto es, el contenido de humedad no se mantuvo constante dentro de rangos bajos de succión. Por tanto, ambas curvas de retención responderían al tipo “S” (Dane y Clarke, 2002).

La capacidad hídrica específica –*specific water capacity*: cambio del contenido de humedad por unidad de succión, Hillel (1998)– en el rango de succión comprendido entre saturación y capacidad de campo fue notoriamente mayor en laboreo convencional que en siembra directa. A succiones mayores, el valor de este parámetro tiende a igualarse en ambos tratamientos. En consecuencia, el suelo bajo siembra directa fue capaz de almacenar una mayor cantidad de agua (aproximadamente 10-15 %, hasta los 100 kPa) que bajo laboreo convencional (Fig. 1); ya que este último tratamiento presentó un mayor contenido de agua denominada gravitante, que drena a succiones bajas (10-15 kPa).

### 3.2. Índice S

**Tabla 2.** Valores de S y coordenadas del punto de inflexión obtenidos con van Genuchten.

|                   | Ecuación van Genuchten |                    |              |
|-------------------|------------------------|--------------------|--------------|
|                   | Índice S               | Punto de inflexión |              |
|                   |                        | $\theta$ (%)       | $\Psi$ (kPa) |
| SD Repetición I   | -0,034                 | 33,38              | 18,54        |
| SD Repetición II  | -0,036                 | 29,30              | 46,19        |
| SD Repetición III | -0,033                 | 38,20              | 8,40         |
| <i>Promedios</i>  | -0,034                 | 33,63              | 24,38        |
| LC Repetición I   | -0,039                 | 29,27              | 10,51        |
| LC Repetición II  | -0,040                 | 35,23              | 2,59         |
| LC Repetición III | -0,027                 | 29,00              | 8,31         |
| <i>Promedios</i>  | -0,035                 | 31,17              | 7,14         |

**Tabla 3.** Valores de S y coordenadas del punto de inflexión obtenidos con ecuación sigmoideal.

|                   | Ecuación sigmoideal |                    |              |
|-------------------|---------------------|--------------------|--------------|
|                   | Índice S            | Punto de inflexión |              |
|                   |                     | $\theta$ (%)       | $\Psi$ (kPa) |
| SD Repetición I   | -0,036              | 37,52              | 3,31         |
| SD Repetición II  | -0,026              | 35,56              | 2,91         |
| SD Repetición III | -0,057              | 36,50              | 14,70        |
| <i>Promedios</i>  | -0,040              | 36,53              | 6,97         |
| LC Repetición I   | -0,063              | 30,15              | 7,55         |
| LC Repetición II  | -0,065              | 29,92              | 11,82        |
| LC Repetición III | -0,044              | 28,65              | 9,22         |
| <i>Promedios</i>  | -0,057              | 29,57              | 9,53         |

Pese al comportamiento contrastante de los dos tratamientos (Fig. 1), el índice S de Dexter (2004a,b) no reflejó dichas diferencias. El “valor S” fue muy similar en ambos tratamientos y las repeticiones presentaron una baja dispersión (Tabla 2). Concretamente, el “índice S” para el tratamiento de siembra directa sobre laboreo convencional fue de 0,034 (desviación estándar= 0,002) y el del laboreo convencional fue de 0,035 (desviación estándar= 0,007). Cabe destacar que, el contenido de humedad correspondiente al punto de inflexión en ambos tratamientos se aproximó a la humedad a capacidad de campo (Tabla 2). Esto concuerda con los resultados de Dexter y Bird (2001) quienes indican que el contenido de humedad asociado al punto de inflexión es el óptimo para el laboreo.

En cambio, la ecuación sigmoideal propuesta en este estudio mostró una dispersión un orden de magnitud mayor entre las repeticiones de ambos tratamientos (0,016 y 0,012 para siembra directa y laboreo convencional, respectivamente) (Tabla 3) que la correspondiente a la registrada con la ecuación de van Genuchten.

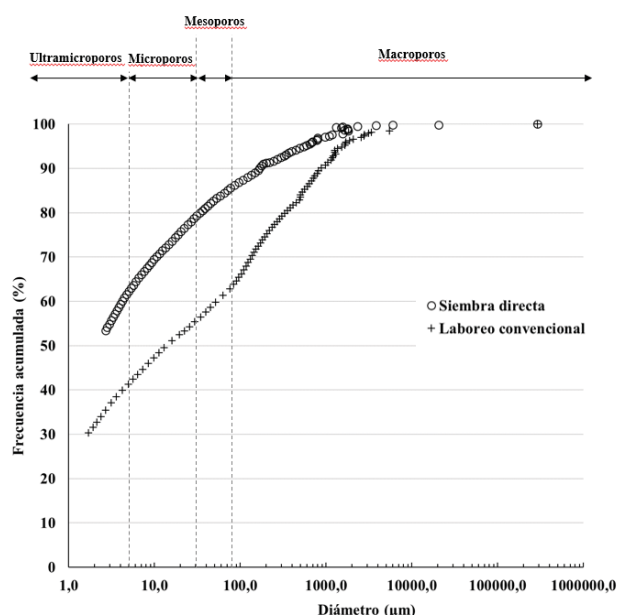
Así pues, esta ecuación sigmoideal alternativa a la de van Genuchten se descartó ya que muestra una alta dispersión entre las repeticiones, haciendo que el promedio no sea consistente.

Es así que, o bien el manejo continuo del suelo con siembra directa durante cerca de dos décadas no generó

una mejora significativa en la estructura del suelo —y por tanto, porosidad asociada—, o el índice S propuesto por Dexter (2004) no es lo suficientemente sensible para detectar dicha mejora. Para conocer esto, harían falta pruebas de laboratorio específicas para evaluar el grado de estructuración del suelo, y/o de estabilidad de sus agregados.

### 3.3. Análisis de la distribución del tamaño de poros en ambos tratamientos

La Fig. 2 muestra la frecuencia acumulada (%) del diámetro de poro ( $\mu\text{m}$ ) para una de las repeticiones de los dos suelos de estudio (siembra directa y laboreo convencional), así como la clasificación de tamaño de poro según lo establecido por *Soil Science Society of America* (2001) (Brady y Weil, 2008) (Fig.2).



**Fig. 2.** Representación de la frecuencia acumulada (%) del diámetro de poro ( $\mu\text{m}$ ) para una de las repeticiones de los suelos de estudio (siembra directa y laboreo convencional), así como la clasificación de tamaño de poro (Brady y Weil, 2008; Soil Science Society of America, 2001). Nota: abscisa en escala logarítmica.

Los mesoporos, con un diámetro equivalente comprendido entre 30 y 80  $\mu\text{m}$  (Fig. 2), son los poros asociados a la retención de agua después del drenaje libre, y con una succión que permite su extracción por parte de las plantas, transmitiendo el agua por capilaridad hasta la zona radicular (Brady y Weil, 2008; Soil Science Society of America, 2001). En ambos tratamientos el porcentaje de mesoporos fue muy similar (en torno al 6%). Si por lo expuesto asumimos que esta población de poros (mesoporos) es la más representativa de la calidad física de un suelo agrícola, se infiere que la siembra directa no produjo una mejora significativa en la estructura.

Sin embargo, la proporción de poros de diámetro equivalente superior a 80  $\mu\text{m}$  (macroporos) fue muy diferente entre los tratamientos. En el laboreo convencional los macroporos representaron cerca del 40 %

de la porosidad total, mientras que en la siembra directa solamente el 15 %.

Al mismo tiempo, la población de poros de menor tamaño (microporos+ultramicroporos, con diámetro equivalente inferior a 30  $\mu\text{m}$ ) no presentó diferencias significativas entre ambos tratamientos (alrededor del 25 % de la población total de poros, Fig. 2), lo que confirma la homogeneidad textural del suelo en las dos zonas de estudio, ya que dicha porosidad está asociada a la textura del suelo más que a su estructura.

#### 4.- Conclusiones

A partir del análisis de detalladas CRHs fue posible realizar una exhaustiva caracterización del espacio poroso de un suelo (0-5 cm) agrícola típico de Navarra, tras 18 años de siembra directa y del mismo suelo bajo laboreo convencional, mediante el uso del dispositivo Hyprop.

La capacidad de almacenamiento de agua fácilmente utilizable por el cultivo –retenida en mesoporos– fue similar en ambos tratamientos. Sin embargo, la siembra directa redujo notoriamente la proporción de macroporos (agua gravitante) con respecto al laboreo convencional. Consecuentemente, el suelo sometido a siembra directa podría llegar a almacenar hasta un 10 % más de agua fácilmente utilizable por la planta (succiones inferiores a 100 kPa); esta diferencia podría ser relevante en agricultura de secano en una zona semiárida como la estudiada.

Por otro lado, esta investigación debería complementarse con la realización de un balance hídrico anual en ambos tratamientos; ya que, por ejemplo, la cubierta vegetal presente en la siembra directa se cree que reduciría la pérdida de agua por evaporación con respecto al laboreo convencional (superficie desnuda).

El índice S (Dexter, 2004) no mostró diferencias significativas entre ambos tratamientos. Esto se debería a que el punto de inflexión que define el valor de S se ubica aproximadamente dentro del rango de succiones/contenido de humedad donde el valor de la capacidad hídrica específica de ambos tratamientos fue similar. Sería recomendable evaluar otros índices matemáticos con un enfoque más integrador de la curva de retención de humedad.

Similares análisis deberían llevarse a cabo en horizontes subsuperficiales del perfil del suelo. Esto resulta particularmente relevante considerando que una de las diferencias comúnmente asociadas al uso de siembra directa frente al laboreo convencional es la estratificación de las propiedades del suelo, y la descompactación progresiva de la suela de labor.

Estos estudios deberían complementarse con análisis de laboratorio tendientes a evaluar el grado de estructuración del suelo y propiedades físico-químicas relacionadas.

*Agradecimientos.* La presente investigación se ha llevado a cabo en el marco del proyecto 011-1365-2020-000075 CropStick: sentinel de sales, pH, Nitrógeno y nutrientes y la percolación de agua en profundidad, financiado por el Gobierno de Navarra.

#### 5.- Bibliografía

- Brady, N.C., y R.R. Weil, 2008. *The nature and properties of soils* (Vol. 13, pp. 662-710). Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- Bescansa, P., M.J. Imaz, I. Virto, A. Enrique, y W.B. Hoogmoed, 2006. Soil water retention as affected by tillage and residue management in semiarid Spain. *Soil and Tillage Research*, 87(1), 19-27.
- Camprubi A., I.A. Zárate, A. Adholeya, P.E. Lovato, y C. Calvet, 2015. Field Performance and Essential Oil Production of Mycorrhizal Rosemary in Restoration Low-Nutrient Soils. *Land Degradation and Development* 26(8): 793–99. DOI:10.1002/ldr.2229.
- Brooks, R.H., y A.T. Corey, 1964. Hydraulic properties of porous media and their relation to drainage design. *Transactions of the ASAE*, 7(1), 26-0028.
- Dane, J.H., y T. Clarke, 2002. *Methods of soil analysis. Part 4. Physical methods* (No. 631.43/D179).
- Dexter, A.R., 2004a. Soil physical quality: Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma*, 120(3-4), 201-214.
- Dexter, A.R., 2004b. Soil physical quality: Part II. Friability, tillage, tith and hard-setting. *Geoderma*, 120(3-4), 215-225.
- Dexter, A.R., y N.R.A. Bird, 2001. Methods for predicting the optimum and the range of soil water contents for tillage based on the water retention curve. *Soil and Tillage Research*, 57(4), 203-212.
- Fontanet, M., 2014. Métodos avanzados para determinar la Capacidad de Campo del suelo [Archivo de video]. Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=o4XLmXlJjQ>
- Hamza, M.A., y W.K. Anderson, 2005. Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil and Tillage Research*, 82(2), 121–145.
- Hillel, D., 1998. *Environmental soil physics*. Academic Press, San Diego., CA.
- Islam, R., y R. Reeder, 2014. No-till and conservation agriculture in the United States: An example from the David Brandt farm, Carroll, Ohio. *International Soil and Water Conservation Research*, 2(1), 97–107. [https://doi.org/10.1016/S2095-6339\(15\)30017-4](https://doi.org/10.1016/S2095-6339(15)30017-4)
- Kodešová, R., V. Jirků, V. Kodeš, M. Múhlhanslová, A. Nikodem, y A. Žigová, 2011. Soil structure and soil hydraulic properties of Haplic Luvisol used as arable land and grassland. *Soil and Tillage Research*, 111(2), 154-161.
- Milly, P.C.D., 1987. Estimation of Brooks-Corey parameters from water retention data. *Water Resources Research*, 23(6), 1085-1089.
- Pagliai, M., N. Vignozzi, y S. Pellegrini, 2004. Soil structure and the effect of management practices. *Soil and Tillage Research*, 79(2), 131-143.
- Peters, A., y W. Durner, 2008: Simplified evaporation method for determining soil hydraulic properties. *Journal of Hydrology*, 356, 147-162.
- Pires, L.F., J.A. Borges, J.A. Rosa, M. Cooper, R.J. Heck, S. Passoni, y W.L. Roque, 2017. Soil structure changes induced by tillage systems. *Soil and Tillage Research*, 165, 66-79.
- Pires, L.F., F.S. Borges, S. Passoni, y A.B. Pereira, 2013. Soil pore characterization using free software and a portable optical microscope. *Pedosphere*, 23(4), 503-510.
- Schindler, U., 1980. Ein Schnellverfahren zur Messung der Wasserleitfähigkeit im teilgesättigten Boden an Stechzylinderproben. *Arch. Acker- Pflanzenbau Bodenkd* 24, 1–7.
- Schindler, U., W. Durner, G. Von Unold, L. Mueller, y R. Wieland, 2010. The evaporation method: Extending the measurement range of soil hydraulic properties using the air-entry pressure of the ceramic cup. *Journal of plant nutrition and soil science*, 173(4), 563-572.
- Soil Science Society of America, 2001. *Glossary of Soil Science Terms 1996* (Madison, Wisc.: Soil Sci. Soc. Amer.).
- Taina, I.A., R.J. Heck, W. Deen, y E.Y. Ma, 2013. Quantification of freeze-thaw related structure in cultivated topsoils using X-ray computer tomography. *Canadian Journal of Soil Science*, 93(4), 533-553.
- Triplett, G.B., y W.A. Dick, 2008. No-Tillage Crop Production: A Revolution in Agriculture! *Agronomy Journal*, 100(S3). <https://doi.org/10.2134/agronj2007.0005c>
- van Genuchten, M.T., y D.R. Nielsen, 1985. On describing and predicting the hydraulic properties. In *Annales Geophysicae* (Vol. 3, No. 5, pp. 615-628).
- van Genuchten, M.T., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil science society of America journal*, 44(5), 892-898.