



Universidad de Valladolid
Campus de Palencia

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIERÍAS AGRARIAS**

Grado en Enología

Efecto de la aplicación de biocarbón de sarmientos sobre las propiedades fisicoquímicas de un suelo de vid

Alumno: Shaowen Lu

Tutor: Francisco Lafuente Álvarez

Julio de 2021

Copia para el tutor/a

ÍNDICE

1. RESUMEN	3
2. INTRODUCCIÓN	4
2.1. Concepto de biochar	4
2.2. Actividades vitícolas y gestión de residuos	4
2.3. Producción de biochar	4
2.4. Composición química de los sarmientos	5
2.5. Alteración fisicoquímica en la producción biochar	6
2.6. Características fisicoquímicas de biochar	6
2.7. Efecto de biochar en suelo agrícola	7
2.8. Biochar y compactación de suelo	8
2.9. Aplicación de biochar	8
3. JUSTIFICACIÓN	9
4. OBJETIVOS	9
5. MATERIAL Y MÉTODOS	9
5.1. Biocarbón	9
5.2. Origen y preparación de muestras de suelo	10
5.3. Medición de penetrabilidad del suelo	11
5.4. Determinación de densidad aparente de suelo	12
5.5. Determinación de pH de suelo	12
5.6. Determinación de fósforo asimilable de suelo	12
5.7. Determinación de nitratos	12
5.8. Tratamiento estadístico	13
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	13
Penetrabilidad del suelo	13
Densidad aparente	15
pH	16
Fósforo asimilable	18
Nitratos	19
7. CONCLUSIONES	21
8. BIBLIOGRAFÍA	22
ANEJOS	25

1. RESUMEN

Se realizó una experiencia de campo con transformación de sarmientos en biochar y aplicación al suelo, en parcelas de viñedo con el fin de comprobar el interés de este aprovechamiento de los residuos de poda y su efecto sobre el suelo. Se han tomado muestras de suelo en marzo de 2020, así como en 2018 (un mes más tarde de la aplicación del biochar).

Se estudiaron los efectos del aporte de biochar en propiedades fisicoquímicas del suelo, con tres tipos de textura y a dos profundidades. Se determinó la facilidad de penetración de una sonda (en 2020), densidad aparente, pH y contenidos de fósforo asimilable Olsen y de nitratos.

El aporte de biochar aumentó la facilidad de penetración de la sonda, medida a dos años de la aplicación, sin observarse cambios en la densidad aparente del suelo. Se encontró un aumento de pH en el muestreo del año de aplicación, pero no a los dos años. No se encontró un aumento significativo en la disponibilidad de fósforo, pero sí en el contenido de nitrato en el año de aplicación.

2. INTRODUCCIÓN

2.1. Concepto de biochar

Biochar es un término inglés que según la Real Academia Española se puede traducir como biocarbón. Es el producto de la descomposición térmica de materiales orgánicos (biomasa) con escaso o limitado suministro de oxígeno (pirólisis), a temperaturas relativamente bajas, inferiores a los 700 °C (Escalante et al., 2016).

La International Biochar Initiative o IBI (2015) además menciona que el biochar es una enmienda sólida del suelo en el uso agrícola y que tiene beneficios ambientales.

La producción de biochar resulta similar a la producción de carbón vegetal. La principal diferencia entre el carbón vegetal y el biochar es el objetivo de su producción. Si se aplica el carbonizado al suelo ya sea para mejorar las propiedades de suelo, almacenar carbono y/o retener agua, dicho carbonizado recibe el nombre de biochar. Otros objetivos del carbonizado son las aplicaciones energéticas, procesos de filtrado o como reductores en la industria; en este caso no son definidos como biochar (Lehmann & Joseph, 2009), se les llamará simplemente "char".

2.2. Actividades vitícolas y gestión de residuos

España es el país tradicionalmente vitícola, tiene un gran historia de viticultura y elaboración de vino. En las prácticas de viticultura, la poda es la operación más importante porque es uno de los fundamentos para obtener uvas de calidad. Los viticultores podan los viñedos anualmente. La operación de poda se puede dividir en dos categorías:

- la poda en seco o la poda de invierno, que se realiza en el reposo invernal de la vid.
- la poda en verde o la poda de verano, que se realiza en el ciclo vegetativo de la vid.

La poda de invierno se realiza con la poda manual (poda con tijera) o mecanizada (podadera o prepodadera). Tras la poda, se recogen y apilan los sarmientos con sarmientadores. La poda de invierno genera gran cantidad de biomasa residual, representando aproximadamente el 93% del total de residuos obtenidos en viticultura (Sánchez et al., 2002).

España es el primer país mundial en superficie total de viñedo (OIV, 2019). En el año 2020 la superficie total de viñedo en España fue de 967234 ha (MAPA, 2020). En la comunidad autónoma de Castilla y León la superficie de viñedo fue de 72891 ha. Si extrapolamos este porcentaje a la superficie de viñedo en España, asumiendo un valor medio de 2.000 cepas / ha y 1,3 kg de sarmientos / cepa, la producción media anual está en torno a $2,51 \times 10^6$ toneladas de sarmientos en toda España.

El valor económico de los sarmientos de poda es casi nulo, ya que se queman principalmente en el campo (Peralbo-Molina et al., 2013) o se utilizan para preparar compost (Devesa-Rey et al., 2011). Sin embargo, considerando que los sarmientos tienen una composición química residual que incluye un elevado número de compuestos de un valor intrínseco importante, debiera promoverse su uso.

2.3. Producción de biochar

Los métodos industriales para obtener biochar son diversos. Se pueden clasificar en cuatro categorías generalmente: pirólisis lenta, pirólisis rápida, pirólisis ultra-rápida y gasificación (Gaunt y Lehmann, 2008; Manyà, 2012). Esta clasificación depende de las condiciones de producción, como el tiempo de residencia, temperatura de calentamiento, presencia de oxígeno, etc.

Pirólisis lenta. Se caracteriza por lapsos de calentamiento de la biomasa pausados, de 0,1 a 2 °C por segundo, temperaturas bajas alrededor de los 500 °C y largos tiempos de residencia de los sólidos de minutos a días (Sadaka, 2007) y del gas: mayor de 5 s. En cambio es el proceso con más alto rendimiento de biocarbón (Gheorghie et al., 2009)

Pirólisis rápida. El calentamiento es mayor a 2 °C por segundo y las temperaturas mayores de 550 °C. Debido al corto tiempo de residencia del vapor, los productos son de alta calidad, principalmente son líquidos. La producción de carbón y alquitrán es mucho menor en este proceso (Frag et al., 2002; Czernik y Bridgwater, 2004; Sadaka, 2007).

Pirólisis ultra-rápida. Se caracteriza porque las temperaturas del proceso son moderadas a 400 - 600 °C y las tasas de calentamiento son rápidas, mayor 2 °C por segundo. Los tiempos de residencia del vapor son usualmente menores a 2 s. Se produce considerablemente menos alquitrán y gas. (Sadaka, 2007; Demirbas, 2009).

En las categorías mencionadas, la palabra "Pirólisis" se ha repetido varias veces. La pirólisis es la descomposición termo-química de una sustancia orgánica por calentamiento en ausencia de oxígeno. En un caso real no es posible crear un ambiente completamente libre de oxígeno. Aunque hay una pequeña cantidad de oxígeno involucrada en la pirólisis, el grado de oxidación de la biomasa es más bajo que el proceso de combustión completa, es decir, se produce menor cantidad de CO₂ y se mantiene una proporción sustancialmente mayor del carbono.

Considerando la dispersión espacial de los viñedos, apenas se han diseñado equipos de pirólisis adaptados a escala industrial para este sector. Sin embargo, cuando se incineran los sarmientos de poda en el campo, se puede crear en el centro del montón de sarmientos un ambiente limitado en oxígeno para controlar el grado de oxidación de carbón, sin completar la combustión y transformación en cenizas. Este proceso se ha llevado a cabo de forma tradicional en la obtención del llamado cisco o carbón de leña para braseros. En este caso, el proceso de combustión incompleta puede considerarse como un proceso de pirólisis lento.

Por otra parte, las propiedades que posea el material tras la pirólisis, estarán directamente relacionados con las propiedades iniciales de la biomasa (Lehmann et al., 2006).

2.4.Composición química de los sarmientos

El sarmiento se caracteriza por dos compuestos principales: la holocelulosa, con un porcentaje de aproximadamente el 55,1% (31,9% de celulosa y 23,2% de hemicelulosa) y la lignina, con un contenido aproximadamente del 38,5% (Briones et al., 2015).

La celulosa es un polímero lineal de β-glucosa unido por enlaces enlaces β-1,4-O-glucosídico. La hemicelulosa son heteropolisacaridos, formando un conjunto heterogéneo de polisacáridos, a su vez formados por dos tipos de monosacáridos unidos por enlaces β (1-4), que tienen una cadena lineal ramificada.

La lignina es un polímero fenólico presente en todas las maderas, con funciones importantes en la estructura celular y en el transporte de agua, nutrientes y metabolitos (Ralph et al., 2004). La lignina se considera una de las fuentes naturales más abundantes, valiosas, renovables y naturales de compuestos de interés (Brebú & Vasile, 2010). Cuando la lignina se somete a altas temperaturas, se liberan compuestos volátiles y no volátiles durante la degradación de su estructura.

Además de los compuestos mencionados, los sarmientos contiene otras sustancias en menor concentración, como minerales, proteínas y carbohidratos (Çetin et al., 2011; Dávila et al., 2016; Sánchez-Gómez et al., 2014) y una pequeña cantidad de compuestos fenólicos de bajo peso molecular (Sánchez-Gómez et al., 2014, Delgado-Torre et al., 2012).

La concentración de minerales depende del tipo de suelo y variedad, entre otros factores, y estos pueden estar asociados con el "efecto terruño" de las vides y vinos porque provienen de la fracción inorgánica del suelo. En el estudio de Çetin et al. (2011) sobre diez cultivares turcos, se mencionó que los sarmientos son ricos en los minerales esenciales, incluidos K, Ca, Fe, Mg, P y Zn. En otro estudio realizado por Mendivil et al. (2013) en sarmientos de cultivares españoles se encontró que la concentración de los nutrientes esenciales como N, S, Al, K y Ca en sarmientos son elevadas. Los residuos de poda podrían usarse como fertilizantes para el crecimiento de las plantas.

2.5. Alteración fisicoquímica en la producción biochar

El proceso de pirólisis lento es más eficiente en la producción de biochar. El proceso de pirólisis incluye las reacciones de descomposición asociadas a los compuestos principales de la biomasa (celulosa, hemicelulosa y lignina). La pirólisis provoca la degradación térmica de la celulosa entre 250 y 350 °C dando lugar a muchos compuestos volátiles (vapores de agua y alquitrán, hidrocarburos, ácidos, H₂, CH₄, CO y CO₂) quedando una matriz de carbono amorfa y rígida (Novak et al., 2009). Al aumentar la temperatura, se incrementa la proporción relativa de carbono aromático por la pérdida de compuestos volátiles y se lleva a cabo la conversión de carbonos. A 330 °C las láminas de grafeno poliaromático empiezan a crecer lateralmente, a expensas de la fase de carbono amorfo y eventualmente coalescen. A 600 °C, se inicia el proceso de carbonización, lo que provoca la remoción de la mayoría de átomos no carbonosos como Calcio, Magnesio, Potasio, que se mantienen en la materia original por lo que aumenta aún más la proporción relativa de carbono. Al final la proporción relativa de carbono puede ser mayor del 90% en peso en los biochares de materias primas de madera (Antal y Grønli, 2003).

En resumen, la partícula de biochar consiste de dos estructurales principales: láminas juntas de grafeno cristalino y estructuras aromáticas amorfas ordenadas, ambas asociadas con enlaces de carbono en forma de anillos de tipo benceno con oxígeno o hidrógeno (Lehmann y Joseph, 2009).

2.6. Características fisicoquímicas de biochar

Según las propiedades físicas, el biochar es un sólido carbonoso, del color negro, con una superficie complicada y desordenada, las características estructurales de biochar dependen del tipo y tiempo de la pirólisis.

El biochar presenta una estructura amorfa, no cristalina (Qiu et al., 2008). El biochar está constituido por partículas de diferentes tamaños, lo que depende de la fuente y tamaño de la materia prima (Lehmann, 2007).

La principal característica estructural del biochar es que posee una alta porosidad. Según el tamaño pueden ser micro (<2 nm), meso (2 - 50 nm) y macroporos (>50 nm) (Rouquerol et al., 1999; Downie et al., 2009). Los macroporos provienen de los espacios propios de la materia prima y los microporos son generados en el proceso de pirólisis. Además, al aumentar la temperatura, se aumenta la microporosidad y generan más área de carga reactiva. Los microporos están asociados a la adsorción de compuestos líquidos, sólidos y de gases (Verheijen et al., 2009). La porosidad aumenta el superficie del biochar, esto es importante por el efecto sobre la capacidad de retener nutrientes y agua (Downie et al., 2009). Sin embargo, esta característica se

altera por el tiempo lo que modifica sus propiedades físicas, químicas y biológicas (Cheng y Lehmann, 2009).

En el análisis de los componentes químicos del biochar se detecta una mayor proporción de carbono y menor de nitrógeno que el material de partida. Según diversos estudios, el contenido de carbono total en el biochar se encuentra entre 172 y 905 g/kg, estando la media por debajo de los 550 g/kg, mientras que el contenido de Nitrógeno total varía entre 1,7 y 78,2 g/kg, dependiendo de la materia prima (Chan & Xu, 2009). El biochar puede ser una fuente de carbono soluble al suelo, mientras que su concentración de nitrógeno es apreciable.

El fósforo se conserva durante la volatilización de moléculas orgánicas asociadas y está presente como cenizas dentro del biochar, y al solubilizarse queda disponible para las plantas (Mašek y Brownsort, 2011). Comparando con otros tipos de materia orgánica, el biochar tiene la mayor capacidad de adsorber aniones fosfato, pero el mecanismo todavía no se conoce muy bien (Lehmann, 2007). Los elementos del fósforo total y el potasio total en el biochar varían ampliamente según la materia prima, con valores entre 2,7 - 480 y 1,0 - 58,0 g / kg (Chan y Xu, 2009).

Los rangos totales de N, P y K en el biochar son más amplios que los fertilizantes orgánicos típicos. Se cree que la mayoría de los minerales dentro de la fracción de cenizas del biochar ocurren como asociaciones discretas independientes de la matriz de carbono, con la excepción de K y Ca. (Amonette y Joseph, 2009).

El pH del biochar varía de ácido a alcalino, con un intervalo entre 6,2 y 13 y un valor medio de 8,1 (Chan y Xu, 2009; Srinivasarao et al., 2013). La capacidad de intercambio catiónico (CIC) es muy variable; algún autor menciona que puede ser muy baja cuando se usan bajas temperaturas en la pirólisis, pero se incrementa a temperaturas más altas (Lehmann, 2007).

Los biochar preparados recientemente tienen cargas positivas en superficie. Las diferencias en las cargas superficiales de biochar están relacionadas con el tiempo y las temperaturas de pirólisis. En el envejecimiento del biochar se generan más cargas negativas que positivas y se incrementa la acidez superficial con el consecuente decrecimiento de la alcalinidad (Cheng y Lehmann, 2009). Los biochar maduros presentan mayor CIC que los jóvenes, por su contacto con el oxígeno y el agua (Cheng et al., 2008).

El biochar incrementa la CIC del suelo y, por lo tanto, la retención de NH_4^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , debido a su elevada superficie específica, alta carga superficial negativa y elevada densidad de carga.

2.7.Efecto de biochar en suelo agrícola

Los factores que condicionan el efecto del aporte de biochar son complejos y están relacionados con múltiples factores, como materias primas, el proceso de elaboración de biochar y el método de aplicación de biochar. Entre ellos, las materias primas determinan el contenido de sustancias químicas en el biochar, por ejemplo la concentración de elementos fertilizantes. El proceso de elaboración del biochar determina sus características fisicoquímicas de biochar por la manera de elaboración (tiempo, temperatura, oxígeno...), lo que influencia la porosidad de biochar, la estabilidad del biochar, etc. Además, el método de elaboración afecta a la presencia de sustancias químicas procedentes de las materias primas. Finalmente, desde la perspectiva de la agricultura, el método de aporte de biochar como enmienda del suelo influencia la absorción de los nutrientes.

La incorporación de biochar al suelo puede alterar sus propiedades físicas tales como estructura, distribución del tamaño de poro, área superficial total y densidad aparente (Verheijen et al. 2009). Tiene efectos positivos sobre la aireación, capacidad de retención de humedad, crecimiento de las plantas y facilidad de laboreo del suelo. Se puede aumentar la permeabilidad de agua y evitar la escorrentía en el suelo donde se aplica, por lo que desde de punto económico se rebaja el costo de riego. Gracias a la capacidad de adsorción del biochar, pueden retener elementos metálicos o contaminantes (Hiller et al., 2007).

Además, como mencioné antes, los elementos minerales en las materias primas vegetales se retienen durante la pirólisis. Estos minerales se convierten en una fuente de nutrientes. La ceniza del biochar se compone principalmente de calcio (Ca), hierro (Fe), magnesio (Mg), sodio (Na), potasio (K), fósforo (P), sílice (Si) y aluminio (Al) (Amonette y Joseph, 2009). Con la excepción del aluminio, estos elementos son nutrientes de las plantas, por lo que su aplicación al suelo con el biocarbón puede aliviar las deficiencias y mejorar el crecimiento de los cultivos.

El aluminio se puede combinar con proteínas, lípidos, carbohidratos, ácidos nucleicos, etc., interfiere con algún metabolismo iónico en las células vegetales, afecta las actividades normales de varios procesos fisiológicos y bioquímicos, inhibiendo así el crecimiento de las plantas.

Algunos autores indican que el biochar actúa como portador de microorganismos, por lo que su adición al suelo puede incrementar la población de hongos micorrícicos y se facilita la retención del nitrógeno en el suelo (Amonette, 2009).

Según recoge Liu et al. (2013) el efecto favorable de la aplicación de biochar puede ser duradero en el tiempo.

Existe una relación entre el cambio climático y las actividades agrícolas. El biochar, por ser una forma recalcitrante de carbono, actúa como reserva de carbono de larga duración, retardando su retorno a la atmósfera como dióxido de carbono, contribuyendo así a evitar el cambio climático. Otro beneficio adicional es que la materia prima para su producción proviene de residuos orgánicos, que a menudo causan problemas de contaminación ambiental.

2.8. Biochar y compactación de suelo

En el ecosistema de las tierras agrícolas, la compactación del suelo se ve afectada principalmente por la lluvia, los equipos agrícolas y los métodos de plantación. La lluvia a menudo hace que se forme una capa de costra tras la evaporación del agua, lo que endurece la superficie del suelo. Los equipos agrícolas compactan la superficie cuando circulan por las parcelas. Cuanto más pesada es la máquina y menor es el área de contacto, mayor es la compactación del suelo. Los métodos de plantación, el manejo del suelo y el efecto de las raíces de las plantas pueden aliviar la compactación del suelo.

La penetrabilidad del suelo es un concepto relacionado a la compactación del suelo. La compactación del suelo conduce a una menor porosidad del suelo, cambios en la estructura física, menor disponibilidad de nutrientes y degradación del suelo.

Debido a la estabilidad química y física del biocarbón, en el proceso de combinación con otros materiales en el suelo, es fácil que permanezca inalterado formando un espacio cerrado y manteniendo un estancia larga. Esto puede cambiar la proporción de aire en el suelo y aumentar la porosidad del suelo.

2.9. Aplicación de biochar

Para aplicar biochar al suelo se deben considerar varios factores:

- los relacionados con el suelo,
- prácticas de cultivo,
- condiciones del entorno (clima, humedad),
- la forma de aplicación.

Puede aplicarse en forma de perdigones junto con otras enmiendas de suelo como abonos o compost. Las cantidades aplicadas deben estar basadas en resultados experimentales. Además, no es necesario aplicarlo repetidamente en un cultivo porque los biocharres son muy estables.

3. JUSTIFICACIÓN

La motivación principal por la que se realiza este estudio se debe a la necesidad de tratamiento de los residuos que se producen en actividades de viticultura, sobre todo en los residuos de poda después de la vendimia. Para garantizar la producción y la calidad de las vides, las podas en verde y en seco son esenciales en los labores de viticultura, generándose una gran cantidad de residuos orgánicos.

El almacén de los residuos en campo, causa un estorbo en las parcelas donde está establecido el viñedo, ya que incomodan la realización de las labores posteriores, bien por tráfico de maquinaria, que molestarían a los viticultores en su trabajo o bien al desarrollo de enfermedades del viñedo.

Considerando el desarrollo sustentable de la viticultura, exploraremos la disponibilidad de los residuos mediante transformación en biocarbón y el efecto de su aplicación al suelo.

4. OBJETIVOS

El objetivo del estudio es comprobar el efecto de la aplicación de biochar de sarmientos sobre las propiedades de los suelos. El biochar aplicado al suelo proviene de los residuos de poda de invierno de las mismas parcelas, transformados en campo directamente. En este estudio enfocamos los efectos de biochar sobre las propiedades de los suelos arenosos, calizos y francos en la parcela estudiada.

Las características fisicoquímicas de las muestras determinadas en este estudio fueron:

- Penetrabilidad del suelo
- Densidad aparente
- Valor de pH
- Fósforo asimilable
- Nitratos

Además, para comprobar el efecto con el paso del tiempo, comparamos los resultados de muestras de suelo tomadas en 2018 (el mismo año de la aplicación) con las de 2020. Aunque el número de muestras de 2018 y 2020 y los puntos exactos no son los mismos, sí procedieron de las mismas parcelas y tipo de suelo.

5. MATERIAL Y MÉTODOS

5.1. Biocarbón

El biocarbón aplicado al suelo se obtuvo por carbonización en campo de sarmientos de vid, mediante combustión controlada e incompleta de los mismos, basada en la técnica tradicional de producción del “cisco” de encina, usado como combustible para braseros. Esta técnica consiste en la formación de una pila de ramas, en este caso sarmientos de vid, que son quemados evitando un gran desarrollo de las llamas con aporte continuo de material combustible, lo que forma una pila de ascuas, cuya combustión se interrumpe mediante la adición de agua, o cubriéndolas con tierra como en este caso. Se utilizaron sarmientos de la propia parcela, carbonizados en campo. Para facilitar la integración en el suelo, se realizó una trituración parcial para disminuir el tamaño de partícula, ya que los trozos obtenidos mantenían su estructura original.

Con este biochar se llevó a cabo una experiencia en campo, en la que se aplicó en dos calles consecutivas en una cantidad equivalente a 15 t/ha, en mayo de 2018. La parcela de viñedo está situada en Gumiel del Mercado (Provincia de Burgos, D.O. Ribera del Duero). El aporte del biochar fue superficial pero se removió el suelo con rastrillo unos pocos centímetros para mejorar su incorporación.

5.2. Origen y preparación de muestras de suelo

Las muestras de 2020 se sacaron en el mes de marzo. Según estudios previos del suelo, la parcela presenta varios tipos de textura. En este estudio determinamos tres puntos de muestreo: el Punto 1 de textura franca, el Punto 2 arenoso y Punto 3 calizo (imagen 1).

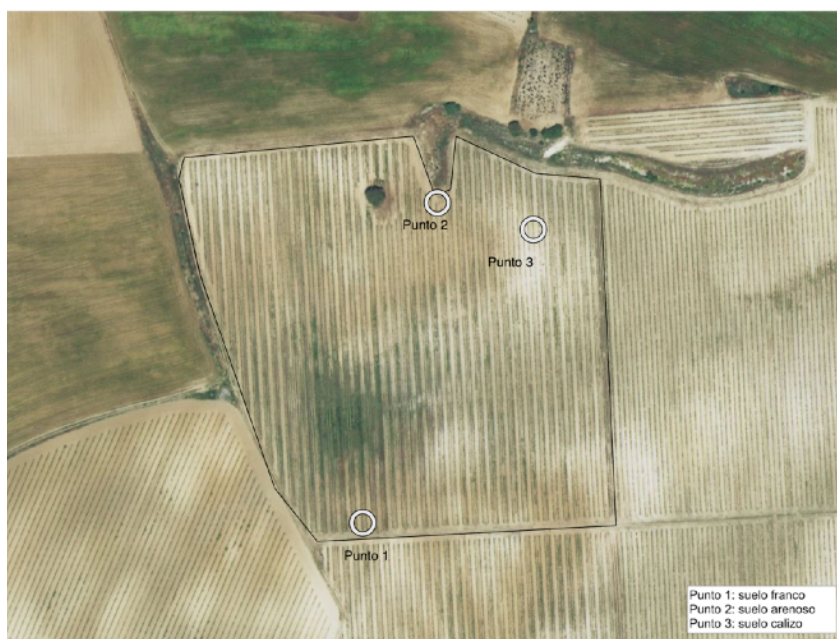


Imagen 1: Puntos de muestreo (Imagen de Google Earth Pro, elaboración propia)

Como se puede apreciar en la Imagen 2, el manejo del laboreo se realiza alternando laboreo superficial entre calles, por lo que se encuentra mayor presencia de vegetación espontánea en las calles no labradas. Se había realizado laboreo 12 días antes de la toma de muestra.

Previamente, en 2018, se tomaron también muestras de suelo 1 mes tras la aplicación del biochar.



Imagen 2: Detalle del Punto 3 (Imagen de Google Earth Pro, elaboración propia)

En cada punto de muestreo, se tomaron un total de doce muestras en tres repeticiones y en cada repetición incluyó cuatro muestras en dos profundidades (0-6 cm y 9-15 cm) con muestra enmendada con biochar y muestra testigo.

Los utensilios utilizados en la extracción de muestra inalteradas de suelo fueron: cilindro metálico ($h= 5,9$ cm y $d= 6,8$ cm), taco de madera, y martillo de goma para introducir el cilindro, y paleta de jardinero y cuchillo de filo liso para extraer y rasear la muestra. Las muestras se transportaron en bolsas plásticas y se secaron al aire.

Después del secado de las muestras de suelo, se disgregaron los agregados y se tamizó con el tamiz de malla de 2 mm. Se separó la tierra fina (utilizada para los análisis siguientes) de otros materiales como restos vegetales (raíces, trozos de sarmientos, etc) y trozos de biochar y piedras, pesándose cada fracción.

5.3. Medición de penetrabilidad del suelo

Debido a que la parcela se maneja con laboreo alternativo entre las calles hicimos la prueba de penetrabilidad con la sonda teniendo en cuenta este factor. Primero, colocamos la sonda en posición vertical sobre la superficie del suelo. Debido a que la sonda en sí tiene un peso de 5,420 kg, la punta de la sonda se hundió en el suelo al colocarla, en unos casos levemente y en otros de forma importante; esta fue la medida sin golpes. Luego se dejó caer el cuerpo móvil de la sonda, desde una posición marcada, sobre la plataforma fija de la sonda, lo que provoca un empuje debido al golpe, hundiendo la sonda más profundamente en el suelo en cada golpe; se realizaron 7 golpes consecutivos. Se apuntaron las distintas profundidades (cm) alcanzadas en tres momentos: sin golpe, con 3 golpes y con 7 golpes.

Según la aplicación de biochar y el laboreo del viñedo, se clasificó la superficie de suelo en cuatro categorías: con biochar y cubierta, con biochar y sin cubierta, sin biochar y cubierta, sin biochar y sin cubierta. Las pruebas se hicieron en la misma posición horizontal en las calles más cercanas a izquierda y derecha. Se realizaron varias repeticiones de la prueba para cada categoría.

5.4.Determinación de densidad aparente de suelo

La densidad aparente definida como la relación entre la masa de suelo seco y el volumen global incluye el volumen de las partículas y el espacio poroso entre las partículas. La densidad real es la relación entre la unidad de peso y volumen de la fase sólida del suelo, este valor es constante y se determina por la composición química y mineralógica de suelo.

Se calculó la densidad aparente con el peso de muestra seca y el volumen del cilindro utilizado en su extracción, descontando el peso y volumen de los elementos gruesos (trozos de biocarbón, materiales vegetales y piedras); para ello se utilizaron probetas de 25 ml y de 50 ml, rompiendo las piedras grandes con martillo metálico.

5.5.Determinación de pH de suelo

En la determinación del pH, usamos el método de Normalización Española UNE-ISO 10390: 2012, para la determinación del pH en suelos. Antes de la medida del pH, se calibró el pH-metro con tampones de pH 4 y 7. Se tomaron 5 ml de muestra de suelo con cuchara de volumen calibrado. Se añadieron 5 veces su volumen de agua (25 ml; con dosificador Brand Dispensette III) en tubos de centrifuga de plástico de 50 ml. Se agitaron los tubos durante 60 minutos con agitador rotatorio (Heidolph Reax 2). Después de la agitación, las suspensiones se dejaron una hora para homogeneización. Al final, se agitaron los frascos antes de la medición del pH (pH-metro Crison pH 25), que se realizó de forma repetida, tras finalizar una primera medida, para obtener resultados más fiables.

5.6.Determinación de fósforo asimilable de suelo

Se realizó por el método Olsen (1954), que utiliza la extracción del P soluble en el medio moderadamente alcalino de bicarbonato sódico 0,5 M ajustado a pH 8,5. Se emplearon 4 g de suelo, pesados con precisión de miligramos, y se agitaron durante 30 minutos (en agitador rotatorio Heidolph Reax 2) junto con 80 ml de disolución extractante en frascos de plástico de 100 ml y se filtró a través de papel de filtro. En la determinación del fósforo extraído se utilizó el procedimiento colorimétrico descrito por Murphy y Riley (1962), modificado por Watanabe y Olsen (1965). Se midieron absorbancias a 882 nm en espectrofotómetro Thermo Spectronic GENESYS 20, comparando con patrones de 0 ppm (blanco), 0,5 ppm, 1 ppm, 1,5 ppm y 2 ppm. En la preparación de los patrones se añadió la disolución de bicarbonato sódico usada como extractante. Se representó con Excel la curva patrón y se calculó la concentración de P en los extractos de suelo y con esta la correspondiente en suelo en mg de P/kg suelo.

5.7.Determinación de nitratos

Se llevó a cabo según métodos oficiales de análisis (MAPA, 1994) y el artículo de Norman et al. (1985). Se realizó una extracción de suelo (10 g / 80 ml de agua + 0,5 g de $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) agitado durante 15 minutos (agitador rotatorio Heidolph Reax 2) y se filtró con papel de filtro previamente lavado. Se midió la absorbancia a 210 nm y 270 nm en espectrofotómetro Milton Roy Spectronic 601 con cubeta de cuarzo. Se utilizó una curva patrón con disoluciones de KNO_3 de 0 ppm (blanco), 2, 4, 6 y 8 ppm del anión nitrato (NO_3^-).

La absorbancia a 210 nm se puede considerar como la cantidad total absorbida por nitratos y material orgánico extraído; se utiliza la absorbancia a 270 nm para descontar la del material orgánico multiplicando previamente por un coeficiente corrector debido a su menor absorbancia a 270 nm; se utilizó un coeficiente de 2,2.

5.8. Tratamiento estadístico

El análisis estadístico de los resultados se realizó con Statgraphics 18 para Windows. Se utilizó un Modelo Lineal General (GLM) para comprobar el efecto de cada factor: Tratamiento con biochar, tipo de suelo y profundidad, así como sus interacciones y si existían diferencias significativas utilizando el test LSD de Fisher con una significación del 95 % ($p < 0,05$). Previamente se comprobó la normalidad de los residuales y la homocedasticidad (igualdad de varianzas) mediante el test de Kolmogorov-Smirnov y el test de Levene, respectivamente. En los casos en que fallaron la normalidad de los residuales o la homocedasticidad, se utilizó la mediana, en vez de la media para realizar el estudio de diferencias significativas.

También se utilizó este software para la representación de los resultados. Los gráficos de cajas y bigotes representan los valores con cajas de color gris limitadas por los cuartiles inferior y superior, la mediana (línea vertical dentro de la caja), media (punto dentro de la caja) y con bigotes (barras horizontales con el intervalo de todos los valores, salvo los puntos exteriores, marcados fuera, con valores de más de 3 veces el rango intercuartil).

Sobre la base de estos datos, se hicieron los siguientes análisis de datos y la comparación:

- Los efectos de los suelos con biochar y sin biochar en la misma textura de suelo
- Los efectos de los suelos con biochar y sin biochar en las distintas texturas de suelo
- La evolución de los efectos de suelos con biochar en el periodo de dos años

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se analizaron y compararon las siguientes variables según los cuatro factores mencionados (aporte de biochar, tipo de suelo, profundidad y año de muestreo):

- Penetrabilidad del suelo
- Densidad aparente
- pH
- Fósforo asimilable
- Nitratos

Para mostrar los resultados se utilizan gráficos de cajas y bigotes y gráficas de medias estadísticas, como se indica en el apartado anterior. Los resultados completos se presentan en las tablas 1, 2 y 3 en anejo.

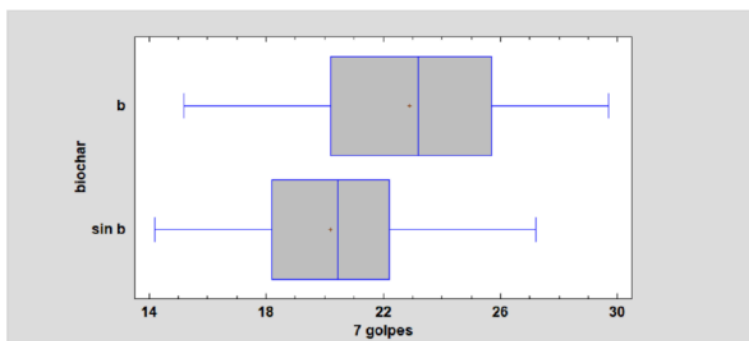
Penetrabilidad del suelo

La medición se realizó en febrero de 2020. Los resultados de las tres medidas sucesivas tuvieron la misma tendencia, con diferencias incrementadas al aumentar el número de golpes, por lo que se comparan las medidas de 7 golpes, indicándose la profundidad, en cm, que se introdujo la sonda.

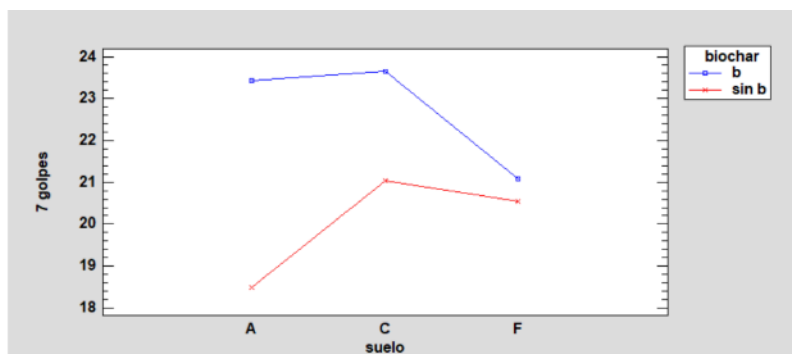
Para el conjunto de datos, el suelo de las calles donde se añadió biochar presentó una menor resistencia mecánica (p -valor 0,0002), es decir, que bajo la misma fuerza externa, la sonda penetró más profundamente (gráfica 1).

Dado que la interacción de los factores biochar y suelo resulta estadísticamente significativa (p -valor: 0,0361) comparamos la influencia del aporte de biochar en los diferentes tipos de suelo (gráfica 2), comprobando que el efecto es más marcado en el

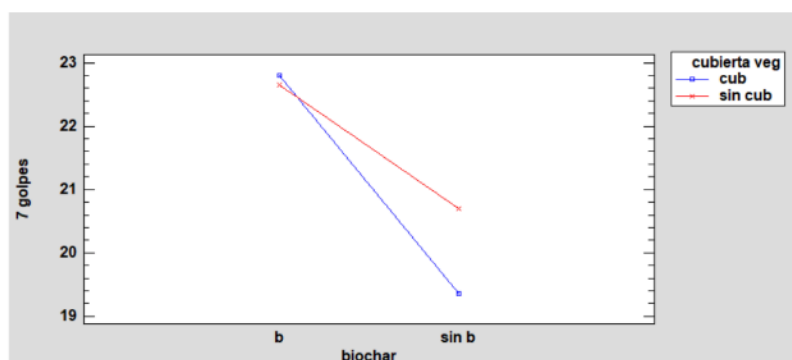
suelo arenoso, con diferencias no tan evidentes en el suelo franco y sin apenas diferencia en el suelo calizo.



Gráfica 1: Efecto del aporte de biochar (b) en la penetrabilidad del suelo (profundidad, en cm, alcanzada por la sonda).



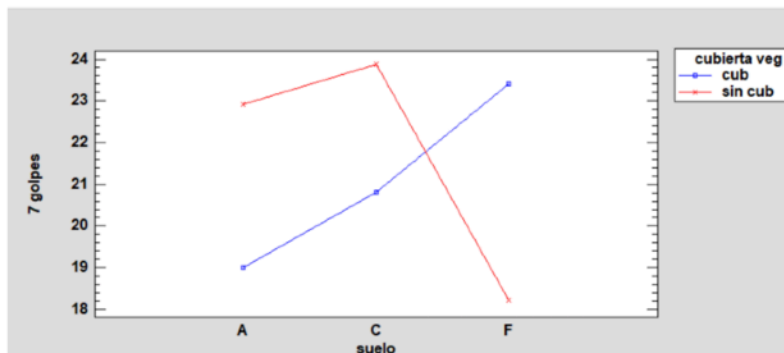
Gráfica 2: Penetrabilidad del suelo: efecto del aporte de biochar (b) según tipo de suelo: arenoso (A), calizo (C), franco (F). Profundidad, en cm, alcanzada por la sonda tras 7 golpes.



Gráfica 3: Penetrabilidad del suelo: efecto del aporte de biochar (b) según la presencia o ausencia de cubierta vegetal (cub). Profundidad, en cm, alcanzada por la sonda tras 7 golpes.

Si comparamos el efecto de la presencia o ausencia de cubierta vegetal (gráfica 3), que en esta variable puede ser muy influyente, observamos que el suelo con cubierta vegetal (no labrado este año) presenta una penetrabilidad más baja sin aplicación de biochar que el que no presenta cubierta vegetal (labrado). En ambos casos la aplicación de biochar aumenta la penetrabilidad del suelo a valores prácticamente iguales, por lo que resulta más claro este aumento en presencia de cubierta vegetal. Finalmente, como dato complementario, vemos en la gráfica 4 que la mayor penetrabilidad por efecto del laboreo del suelo (suelo sin cubierta vegetal) se encontró

solo en el suelo arenoso y el calizo mientras que el efecto se invierte en el suelo franco.

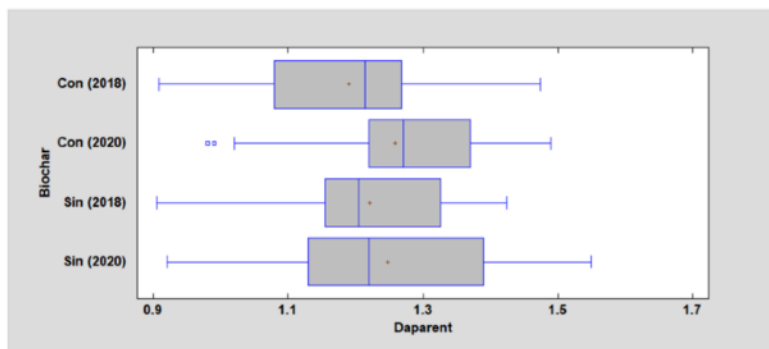


Gráfica 4: **Penetrabilidad del suelo:** efecto de la **cubierta vegetal (cub)** según tipo de suelo: arenoso (A), calizo (C), franco (F). Profundidad, en cm, alcanzada por la sonda tras 7 golpes.

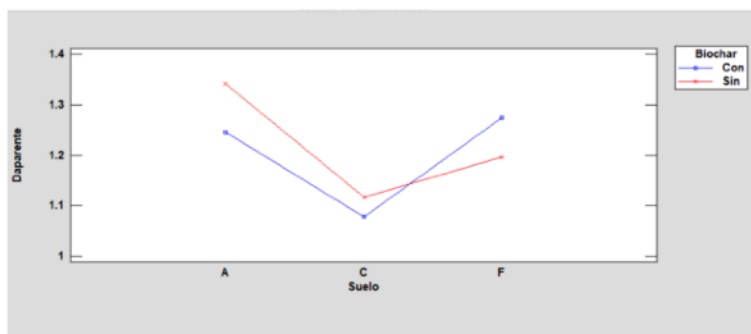
Densidad aparente

Se estudia el efecto del aporte de biochar en la densidad aparente considerando independientemente el muestreo de 2018 y el de 2020.

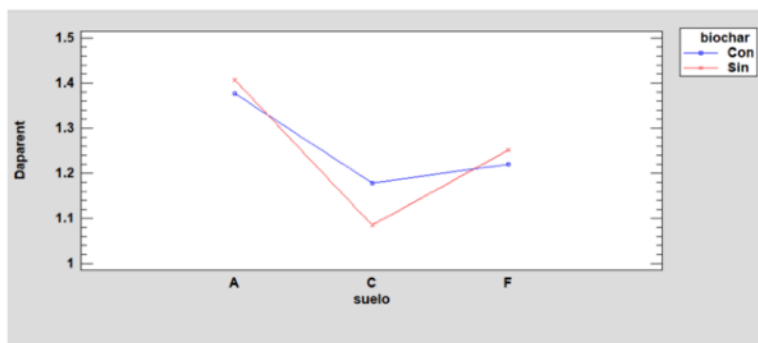
Los resultados (gráficas 5, 6 y 7) no han dado diferencias significativas con el factor aporte de biochar en ninguno de los dos años. Probablemente el efecto sea pequeño y haya tenido más influencia la variabilidad espacial del suelo.



Gráfica 5: Densidad aparente (g/cm³). Efecto del aporte de biochar (Con) en los dos muestreos (2018 y 2020).



Gráfica 6: Densidad aparente (g/cm³) en muestreo de 2018. Efecto del aporte de biochar (Con) según tipo de suelo: arenoso (A), calizo (C), franco (F).



Gráfica 7: Densidad aparente (g/cm³) en muestreo de 2020. Efecto del aporte de biochar (Con) según tipo de suelo: arenoso (A), calizo (C), franco (F).

En ambos muestreos el estudio estadístico muestra interacción del efecto del biochar según el suelo (gráficas 6 y 7), por lo que los resultados no mostraron la misma tendencia de cambio en los tres tipos de suelo. Además, el sentido del efecto del biochar en cada suelo no es consistente entre los dos muestreos. Como conclusión podemos decir que no se ha apreciado un efecto claro sobre esta propiedad del suelo. Es posible que sea necesario un mayor número de muestras para obtener diferencias significativas.

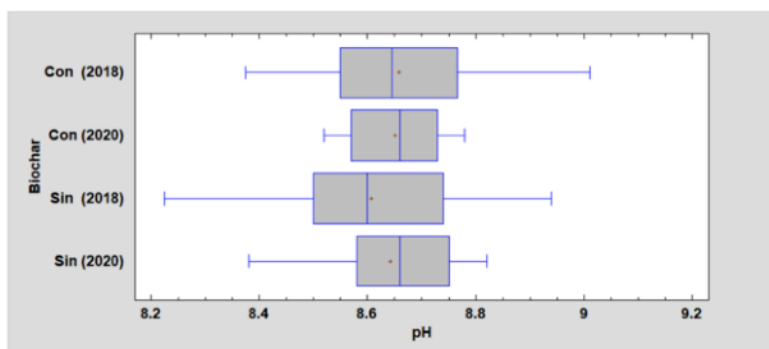
Por otro lado, en los resultados de los dos años de pruebas, la densidad aparente del suelo arenoso fue mayor que la de los otros suelos, la del suelo calizo fue menor y del suelo franco intermedia. Hubo también un incremento con la profundidad, aunque solo en el año 2020, en el que se descontó el efecto de la presencia de elementos gruesos.

La aplicación de biochar puede cambiar la densidad aparente. El efecto dependerá de las características del biochar, pero dado que la densidad de biochar es mucho menor que la de suelo mineral, cabe esperar en principio un descenso de la densidad general del suelo (Woolf et al., 2010).

Sin embargo otros autores mencionaron otra posibilidad y explicación: si el biochar tiene baja resistencia mecánica, las partículas de descomposición del biochar se van a rellenar los espacios de poros en suelo; en este caso, la porosidad de suelo disminuye y se produce un aumento de la densidad aparente (Verheijen et al., 2009).

pH

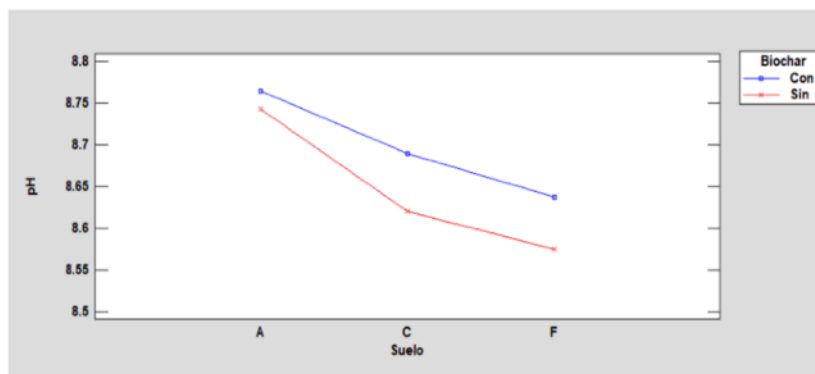
Se representan en la gráfica 8 los resultados de muestras con y sin biochar en 2018 y 2020.



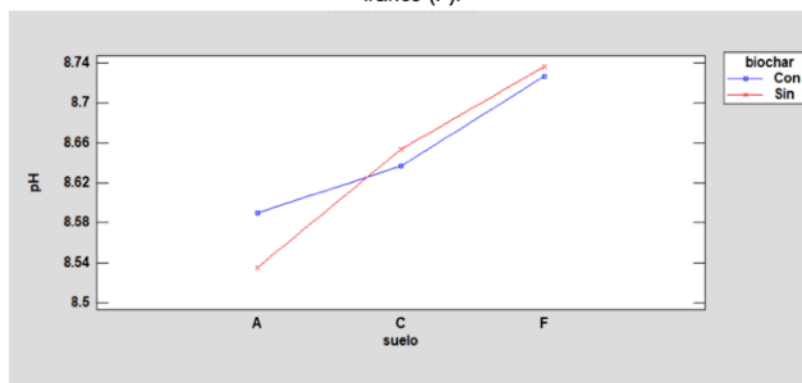
Gráfica 8: pH. Efecto del aporte de biochar (Con) en los dos muestreos (2018 y 2020).

En ambos años los valores de pH son altos: en 2018, con efecto estadísticamente significativo del aporte de biochar, el pH del suelo con biochar dio valores desde 8,38 hasta 9,01 y en el suelo sin biochar desde 8,23 hasta 8,94 mientras que en los resultados de 2020 el pH de suelo con biochar y sin biochar fue similar, con valores en conjunto entre 8,38 y 8,82.

Por lo tanto, el aporte de biochar solo tuvo un efecto significativo en el cambio de pH del suelo en el primer muestreo, perdiéndose a los dos años.



Gráfica 9: pH en muestreo de 2018. Efecto del aporte de biochar (Con) según tipo de suelo: arenoso (A), calizo (C), franco (F).



Gráfica 10: pH en muestreo de 2020. Efecto del aporte de biochar (Con) según tipo de suelo: arenoso (A), calizo (C), franco (F).

En las gráficas 9 y 10 comparamos el efecto del biochar sobre el pH en los distintos tipos de suelo para cada muestreo.

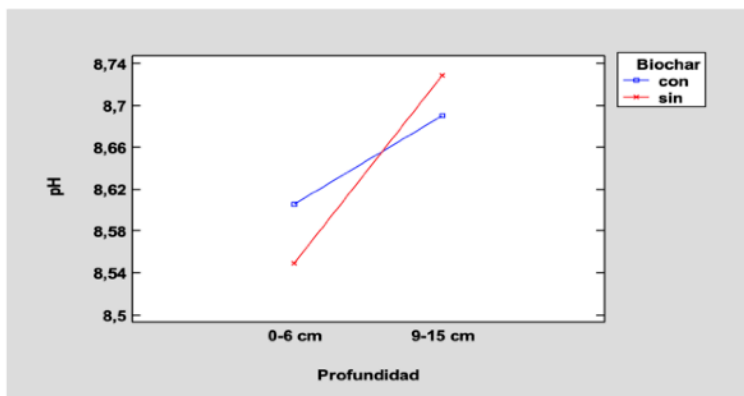
En las muestras de 2018, la aplicación de biochar aumenta el valor del pH en cada textura de suelo, pero el efecto parece ser menor en el suelo arenoso, con pH más alto de partida.

En las observaciones de 2020, sin embargo, el pH del suelo arenoso fue el más bajo de los tres suelos y la aplicación de biochar aumentó su pH. En consonancia con los resultados del muestreo de 2018, si el pH del suelo en el grupo de control es originalmente alto, el impacto del biochar en el pH del suelo ha sido muy limitado.

La conclusión también coincide con la opinión de la mayoría de autores mencionando que el biochar es un mejorante de pH en suelos ácidos o neutros.

Aunque en el muestreo de 2020 no hubo diferencias significativas en el conjunto de datos para el efecto sobre el pH, dado que el factor profundidad tuvo interacción

estadísticamente significativa con el biochar, se debe estudiar el efecto del aporte de biochar por separado en cada profundidad.



Gráfica 11: pH en muestreo de 2020. Efecto del aporte de biochar (con) según profundidad de muestreo.

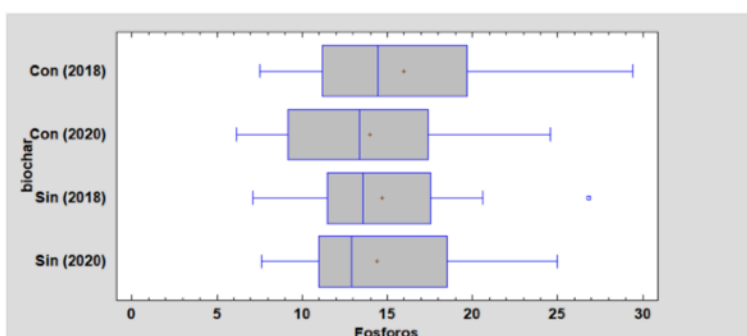
En la gráfica 11 se representa esta interacción entre los dos factores, en la que se observa que en la primera profundidad el pH es más alto en las muestras con biochar, al contrario que en la segunda profundidad. Debido a que el biochar se concentra en la superficie del suelo principalmente, tiene el mayor efecto en la superficie que en el horizonte más profundo (el bajo número de fragmentos que se encontraron en la muestra profunda también confirmó esta conjetura). Por tanto el efecto de aumento de pH podría ser temporal, pero mantenerse en la zona de mayor acumulación de biochar.

Como se observa en la gráfica 11, al igual que en el muestreo de 2018, el pH de las muestras de mayor profundidad fue mas alto que las superficiales.

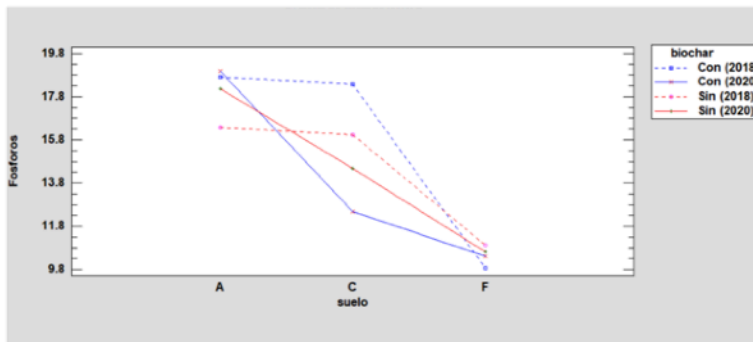
Un aumento de pH en distintos tipos de suelo también ha sido encontrado en trabajos realizados con el mismo tipo de biochar en el Área de Edafología y Química Agrícola de la ETSIIIAA (Gilces, 2014).

Fósforo asimilable

Se presenta en la gráfica 12 la comparación del contenido de fósforo asimilable en suelo con y sin aplicación de biochar en los dos muestreos.



Gráfica 12: Fósforo asimilable Olsen (mgP/kg). Efecto del aporte de biochar (Con) en los dos muestreos (2018 y 2020).



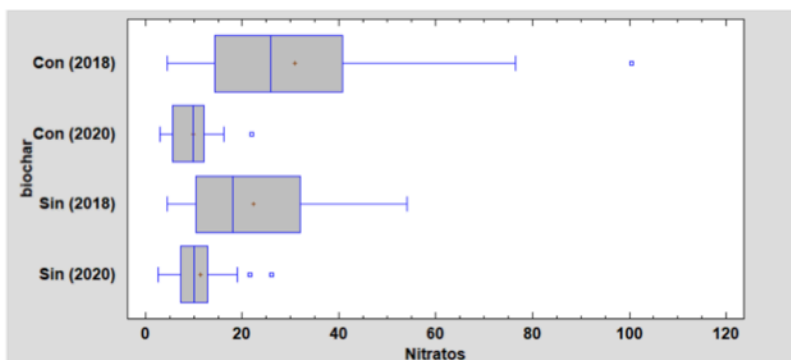
Gráfica 13: Fósforo asimilable Olsen (mgP/kg) en los dos muestreos (2018 y 2020). Efecto del aporte de biochar (Con) según tipo de suelo: arenoso (A), calizo (C), franco (F).

Comparando el efecto del tipo de suelo (gráfica 13), en el año de aplicación, 2018, el biochar provoca un aumento sobre el fósforo asimilable solo en el suelo arenoso y el calizo que son sin embargo los que tienen valores más altos. En el muestreo de dos años más tarde no se aprecia efecto significativo.

Olmo (2016) en un suelo calizo y Gilces (2014) en tres tipos de suelo, sí encontraron en experiencias de invernadero un incremento en el contenido de P Olsen. En nuestro caso, una dosis moderada y la propia variabilidad del suelo en experiencias de campo, puede haber enmascarado este efecto.

Nitratos

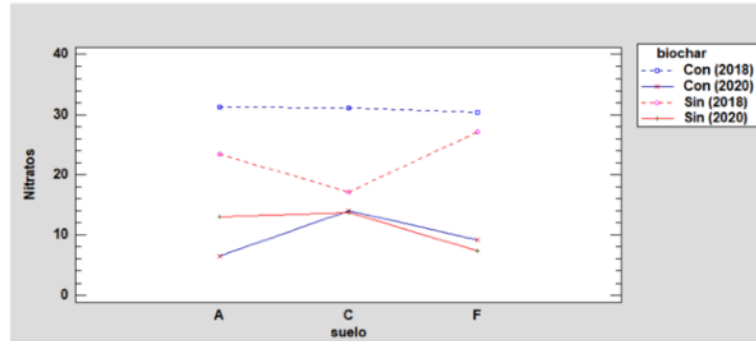
La comparación del contenido de nitrato en suelo con biochar y sin biochar en 2018 y 2020 se presenta en la gráfica 14.



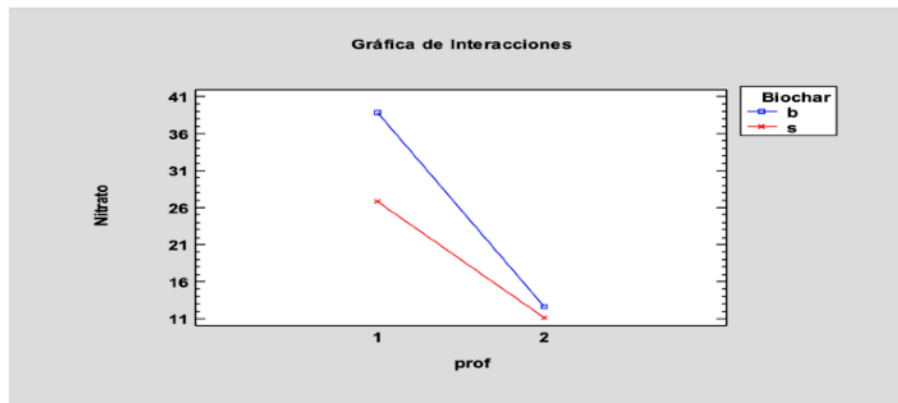
Gráfica 14: Nitrato (mg/kg). Efecto del aporte de biochar (Con) en los dos muestreos (2018 y 2020).

En los datos de 2018, vemos que la aplicación de biochar tiene un pequeño aumento en el nitrato. Según los resultados de 2020, el biochar no tiene ningún efecto positivo sobre el nitrato.

Además, también se compararon los efectos del aporte de biochar en los distintos tipos de suelo. Los resultados se presentan en gráfica 15. En los datos de 2018, la aplicación de biochar aumentó la concentración de nitratos en todos los tipos de suelo especialmente en suelo arenoso y suelo calizo. Sin embargo, en el suelo franco los resultados se reflejan mal sobre el aporte de biochar. En los datos de 2020, el aporte de biochar no tiene un impacto significativo en los diferentes suelos.



Gráfica 15: Nitrato (mg/kg) en los dos muestreos (2018 y 2020). Efecto del aporte de biochar (Con) según tipo de suelo: arenoso (A), calizo (C), franco (F).



Gráfica 16: Nitrato (mg nitrate/kg) 2018. Efecto del aporte de biochar (b) según profundidad (1: 0-6 cm; 2: 9-15 cm).

En la gráfica 16 se observa el efecto de la profundidad en el muestreo inicial en 2018, comprobándose que hubo incremento en la zona superficial, pero no en la siguiente capa. Al no observarse este efecto en 2020, el aporte de nitrato con el biochar podría haber sido absorbido por el cultivo, vegetación espontánea o microorganismos. Por otra parte, dada la alta movilidad del nitrato cabe pensar que sea difícil detectar pequeñas diferencias después de dos años del aporte.

Este efecto de la profundidad también puede estar relacionado con la forma de aplicación.

7. CONCLUSIONES

- (1) El efecto de la aplicación de biochar fue significativo en la penetrabilidad del suelo, pH y contenido de nitrato.
- (2) En general los tres tipos de suelo se comportaron de forma similar, pero hubo diferencias entre ellos en el cambio de sus propiedades fisicoquímicas.
- (3) Los cambios producidos fueron temporales y no se apreciaron a los dos años de la aplicación.
- (4) Hubo un efecto importante del factor profundidad, con cambios más apreciables en la capa más superficial

8. BIBLIOGRAFÍA

- Amonette J., Joseph S. 2009. Characteristics of Biochar - Micro-Chemical Properties (Chapter 3), in: J. Lehmann and S. Joseph (Eds.), *Biochar for Environmental Management: Science and Technology*. 33 p.
- Antal, Jr. M. J. and M. Grønli. 2003. The art, science, and technology of charcoal production. *Ind. Eng. Chem. Res.* 42: 1619-1640 p.
- Briones, R., Torres, L., Saravia, Y., Serrano, L., Labidi, J. 2015. Liquefied agricultural residues for film elaboration. *Industrial Crops and Products*. 78, 19-28 p.
- Çetin, E. S., Altinöz, D., Tarçan, E., Göktürk Baydar, N. Chemical composition of grape canes. *Industrial Crops and Products*. 2011, 34, 994-998 p.
- Chan, K. Y. and Z. H. Xu. 2009. Biochar: Nutrient properties and their enhancement. 67-84 p. In: J. Lehmann and S. Joseph (eds.). *Biochar for environmental management: Science and technology*. Earthscan. London, UK.
- Cheng, C. H. and J. Lehmann. 2009. Ageing of black carbon along a temperature gradient. *Chemosphere* 75: 1021-1027 p.
- Cheng, C. H., J. Lehmann, and M. H. Engelhard. 2008. Natural oxidation of black carbon in soils: Changes in molecular form and surface charge along a climosequence. *Geochim. Cosmochim. Acta*. 72: 1598-1610 p.
- Curiel M., 2016. Caracterización de residuos de vid transformados en biochar. 1-2 p.
- Czernik, S. and A. V. Bridgwater. 2004. Overview of applications of biomass fast pyrolysis. *Oil. Eng. Fuels* 18: 590-598 p.
- Dávila, I., Gordobil, O., Labidi, J., Gullón, P. Assessment of suitability of vine shoots for hemicellulosic oligosaccharides production through aqueous processing. 2016. *Bioresource Technology*. 211, 636-644 p.
- Delgado, M. P., Priego-Capote, F., Luque, M. D. 2012. Evaluation of the composition of vine shoots and oak chips for oenological purposes by superheated liquid extraction and high-resolution liquid chromatography-time-of-flight/mass spectrometry analysis. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 60, 3409-3417 p.
- Demirbas, M. F., 2009. Biorefineries for biofuel upgrading: A critical review. *Appl. Eng.* 86: S151-S161.
- Devesa-Rey, R., Vecino, X., Varela-Alende, J. L., Barral, M. T., Cruz, J. M., Moldes, A. B. 2011. Valorization of winery waste vs. the costs of not recycling. *Waste Management*. 31, 2327-2335 p.
- Downie, A., A. Crosky, and P. Munroe. 2009. Physical properties of biochar. 13-30 p. In: J. Lehmann and S. Joseph (eds.). *Biochar for environmental manage*
- Escalante, A., G. Pérez, C. Hidalgo, J. López, J. Campo, E. Valtierra y J. D. Etchevers. 2016. Biocarbón (biochar) I: Naturaleza, historia, fabricación y uso en el suelo. *Terra Latinoamericana* 34: 367-382.
- Farag, I. H., C. E. LaClair, and C. J. Barrett. 2002. Technical, environmental and economic feasibility of bio-oil in New Hampshire's north country. New Hampshire Industrial Research Center. Página de consulta: www.unh.edu/p2/biooil/bounhif.pdf.
- Gaunt, J. L.; Lehmann, J., 2008. Energy balance and emissions associated with biochar sequestration and pyrolysis bioenergy production. *Environmental Science & Technology*, 42(11): 4152-4158 p.
- Gheorghe, C., C. Marculescu, A. Badea, C. Dinca, and T. Apostol. 2009. Effect of pyrolysis conditions on bio-char production from biomass. 239-241 p. In:

- Proceedings of the 3rd WSEAS Int. Conf. on Renewable Energy Sources, July 1-3 2009. Tenerife Canary Island, Spain. ISBN: 978-960-474-093-2.
- Gilces, A. (2014). Efectos de la aplicación de biochar y cenizas en las propiedades del suelo. Trabajo Fin de Máster. Máster en Tecnologías Avanzadas para el Desarrollo Agroforestal. Universidad de Valladolid.
- Hiller, E., A. Fargasova, L. Zemanova, and M. Bartal. 2007. Influence of wheat ash on the MCPA immobilization in agricultural soils. *Bull. Environ. Contaminat. Toxicol.* 79: 478-481 p.
- IBI (International Biochar Initiative). 2015. Standardized product definition and product testing guidelines for biochar that is used in soil. 9 p. Página de consulta: www.biochar-international.org. Fecha de consulta: 2021/02/08. Document reference code: IBI-STD-2.1.
- Laird, D. A., R. Brown, J. Amonette, and J. Lehmann. 2009. Review of the pyrolysis platform for coproducing bio-oil and biochar. *Biofpr* 3: 547-562 p.
- Lehmann J., Gaunt J., Rondon M. 2006. Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems—a review. *Mitigation Adapt Strat Global Change* 11(2): 395-419 p.
- Lehmann, J. 2007. Bio-energy in the black. *Front. Ecol. Environ.* 5: 381-387 p.
- Lehmann, J. and S. Joseph. 2009. Biochar for environmental management. *Science and technology. Earthscan. UK-USA.*
- Liu, X., Zhang, A., Ji, C., Joseph, S., Bian, R., Li, L., et al. 2013. Biochar's effect on crop productivity and the dependence on experimental conditions—a meta-analysis of literature data. *Plant and Soil* 373:583-594.
- MANYÀ, J. J., 2012. Pyrolysis for biochar purposes: a review to establish current knowledge gaps and research needs. *Environmental science & technology*, 46(15): 7939–7954 p.
- MAPA (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación). Encuesta sobre Superficies y Rendimientos Cultivos (ESYRCE). 2020. 8, 27 p. Página de consulta: <https://www.mapa.gob.es/es/estadistica/temas/estadisticas-agrarias/agricultura/esyrce/>. Fecha de consulta: 2021/02/09.
- MAPA (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación). 1994. Métodos oficiales de análisis Tomo III. 267-270 p.
- Mašek, O. and P. Brownsort. 2011. Biochar Production. 37-44 p. In: S. Shackley and S. Sohi (eds.). *An Assessment of the benefits and issues associated with the application of biochar to soil.* UK Biochar Research Centre. UK.
- McLaughlin, H., P. S. Anderson, F. E. Shields, and T. B. Reed. 2009. All biochars are not created equal, and how to tell them apart. North American Biochar Conference. Boulder, CO <http://www.biochar-international.org/sites/default/files/All-Biochars--Version2--Oct 2009.pdf>.
- Mendivil, M. A., Muñoz, P., Morales, M. P., Juárez, M. C., García- Escudero, E. 2013. Chemical characterization of pruned vine shoots from la Rioja (Spain) for obtaining solid bio-fuels. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 5 p.
- Murphy, J. and Riley, J.P. 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Analytica Chimica*, vol. 27, 31-36 p.
- Normalización Española de UNE-ISO 10390: 2012, Calidad del suelo: Determinación del pH, AENOR, 2012.
- Norman, R.J., Edberg, J.C. and Stucki, J.W. 1985. Determination of nitrate in soil extracts by dual-wavelength ultraviolet spectrometry. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, vol. 49, 1182-1184 p.

- Olmo, M. Efectos del biochar sobre el suelo, las características de la raíz y la producción vegetal. 2016. Tesis doctoral. Universidad de Córdoba.
- Olsen, R.S., V.C. Cole, F.S. Watanabe and L.A. Dean. 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. USDA. Washington, D.C. Circular 939.
- Organización Internacional de la Viña y el Vino. Actualidad de la coyuntura del sector vitivinícola mundial en 2019. 5 p. Página de consulta: <https://www.oiv.int/es/actualidad-de-la-oiv/situacion-actual-del-sector-vitivinicola-a-nivel-mundial>. Fecha de consulta: 2021/02/09.
- Ovak, J. M., I. Lima, B. Xing, W. Gaskin, C. Steiner, K.C. Das, M. Ahmedna, D. Rehrah, D.W. Watts, W. J. Busscher, and H. Schomberg. 2009. Characterization of designer biochar produced at different temperatures and their effects on a loamy sand. *Ann. Environ. Sci.* 3: 195-206 p.
- Peralbo-Molina, T., Luque de Castro, M. D. 2013. Potential of residues from the Mediterranean agriculture and agrifood industry. *Trends in Food Science and Technology.* 32, 16-24 p.
- Qiu, S., A. J. McComb, and R. W. Bell. 2008. Ratios of C, N and P in soil water direct microbial immobilization–mineralization and N availability in nutrient amended sandy soils in southwestern Australia. *Agric. Ecosyst. Environ.* 127: 93-99 p.
- Ralph, J., Lundquist, K., Brunow, G., Lu, F., Kim, H., Schatz, P. F., Marita, J. M., Hatfield, R. D., Ralph, S. A., Christensen, J. H., Boerjan, W. Lignins. 2004. Natural polymers from oxidative coupling of 4- hydroxyphenyl-propanoids. *Phytochemistry Reviews.* 3, 29-60 p.
- Reyneir A., 2012. Mundi-Prensa. Manual de viticultura (6ª edición): 295-320 p.
- Roberts, K.G., Gloy, B.A., Joseph, S., Scott, N.R., Lehmann, J. 2009. Life Cycle Assessment of Biochar Systems: Estimating the Energetic, Economic, and Climate Change Potential. *Environmental Science & Technology*, 44(2), 827-833 p.
- Rosa J., 2015. Tesis doctoral: Producción de biochar a partir de viñas agotadas mediante pirólisis en reactor a escala piloto y en reactor móvil energéticamente sostenible. 17-34 p.
- Sadaka, S. 2007. 2. PYROLYSIS. Center for sustainable environmental technologies. Department of Agricultural and Biosystems Engineering. Iowa State University. Nevada. Página de consulta: <http://bioweb.sungrant.org/NR/rdonlyres/57BCB4D0-1F59-4BC3-A4DD-4B72E9A3DA30/0/> .
- Sánchez, A., Ysunza, F., Beltran-García, M. J., Esqueda, M. 2002. Biodegradation of viticulture wastes by *Pleurotus*: A source of microbial and human food and its potential use in animal feeding. *Journal of Agricultural and Food Chemistry.* 50, 2537-2542 p.
- Sánchez-Gómez, R., Zalacain, A., Alonso, G. L., M. R. Salinas. 2014. Vine-shoot waste aqueous extracts for re-use in agriculture obtained by different extraction techniques: Phenolic, volatile, and mineral compounds. *Journal of Agricultural and Food Chemistry.* 62, 10861-10872 p.
- Verheijen, F. G. A., S. Jeffery, A. C. Bastos, M. van der Velde, and I. Diafas. 2009. Biochar application to soils - A critical scientific review of effects on soil properties. *Processes and Functions*, 59-66 p.
- Watanabe, F.S. and Olsen, S.R. 1965. Test of an ascorbic acid method for determining phosphorus in water and NaHCO₃ extracts from the soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, vol. 29, 677-678 p.
- Woolf D., Amonette J.E., Street-Perrot F.A., Lehmann J., José S. 2010. Sustainable biochar to mitigate global climate change. *Nature Communications*, 1: 56.

ANEJOS

Tabla 1: Resultados de 2018

Biochar	Profundidad	Suelo	pH	Fósforo (mg/kg)	Nitratos (mg/kg)	Daparente (g/cm ³)
Sin (2018)	0-6 cm	F	8,45	9,69	39,5	1,28
Sin (2018)	9-15 cm	F	8,74	7,12	8,72	1,19
Sin (2018)	0-6 cm	F	8,26	12,56	54,04	1,06
Sin (2018)	0-6 cm	F	8,42	11,97	35,11	1,2
Sin (2018)	0-6 cm	F	8,5	12,36	20,07	1,19
Sin (2018)	0-6 cm	F	8,53	11,1	10,47	1,25
Con (2018)	9-15 cm	F	8,77	8,6	8,07	1,32
Con (2018)	0-6 cm	F	8,62	8,5	18,81	1,35
Sin (2018)	0-6 cm	F	8,5	12,36	18,88	1,09
Con (2018)	0-6 cm	F	8,66	12,5	32,45	1,16
Con (2018)	0-6 cm	F	8,62	7,5	12,03	1,27
Con (2018)	0-6 cm	F	8,51	11	39,11	1,29
Con (2018)	0-6 cm	F	8,47	10,58	39,44	1,23
Con (2018)	0-6 cm	F	8,55	11,67	34,92	1,25
Con (2018)	0-6 cm	F	8,54	9,5	65,44	1,26
Sin (2018)	0-6 cm	F	8,6	11,2	29,89	1,19
Con (2018)	0-6 cm	F	8,46	11,17	41,14	1,47
Sin (2018)	0-6 cm	F	8,48	11,5	40,16	1,27
Con (2018)	0-6 cm	A	8,88	18,59	23,82	1,36
Con (2018)	0-6 cm	A	8,9	12,83	14,27	1,41
Sin (2018)	0-6 cm	A	8,62	15,38	53,11	1,34
Sin (2018)	0-6 cm	A	8,76	13,78	40,14	1,39
Con (2018)	0-6 cm	A	8,65	18,93	76,43	1,35
Sin (2018)	0-6 cm	A	8,49	26,85	15,24	1,38
Sin (2018)	0-6 cm	A	8,85	13,6	7,54	1,4
Sin (2018)	0-6 cm	A	8,84	13,9	13,66	1,42
Sin (2018)	0-6 cm	A	8,76	20,12	21,92	1,37

Sin (2018)	0-6 cm	A	8,75	17,43	18,15	1,4
Con (2018)	0-6 cm	A	8,64	27,35	44,17	1,2
Sin (2018)	0-6 cm	A	8,67	19,92	31,03	1,33
Con (2018)	9-15 cm	A	9,01	17,83	16,01	1,2
Sin (2018)	9-15 cm	A	8,94	17,56	17,84	1,3
Con (2018)	0-6 cm	C	8,71	26,12	40,66	1,42
Sin (2018)	9-15 cm	C	8,8	9,64	4,43	1,2
Con (2018)	0-6 cm	C	8,8	14,43	17,09	1,16
Con (2018)	9-15 cm	C	8,79	8,74	6,96	1,09
Sin (2018)	0-6 cm	C	8,54	20,62	31,94	1,16
Sin (2018)	0-6 cm	C	8,52	14,93	28,13	1,14
Sin (2018)	9-15 cm	C	8,73	11,34	8,83	1,19
Sin (2018)	0-6 cm	C	8,51	18,43	34,22	0,9
Sin (2018)	0-6 cm	C	8,6	17,13	42,8	1,16
Sin (2018)	9-15 cm	C	8,72	14,93	5,29	1,15
Con (2018)	9-15 cm	C	8,73	13,53	7,97	0,95
Con (2018)	0-6 cm	C	8,63	22,22	52,25	0,91
Sin (2018)	9-15 cm	C	8,66	19,03	12,85	1,27
Con (2018)	0-6 cm	C	8,59	24,42	36,44	1,02
Sin (2018)	0-6 cm	C	8,5	13,53	10,43	0,94
Con (2018)	0-6 cm	C	8,66	18,23	17,63	1
Con (2018)	0-6 cm	C	8,64	14,53	25,63	1,05
Sin (2018)	0-6 cm	C	8,54	19,83	9,14	0,96
Con (2018)	9-15 cm	C	8,87	12,03	4,57	1,08
Con (2018)	0-6 cm	C	8,58	29,41	45,46	0,97
Con (2018)	0-6 cm	C	8,49	17,03	11,62	1,23
Con (2018)	9-15 cm	C	8,7	15,93	5,01	1,13
Sin (2018)	0-6 cm	C	8,48	20,52	13,96	1,19
Con (2018)	0-6 cm	C	8,51	22,12	100,4	1,1
Con (2018)	0-6 cm	C	8,56	23,52	69,41	1,07

Sin (2018)	9-15 cm	C	8,66	12,33	4,51	1,04
Con (2018)	9-15 cm	C	8,71	13,33	26,24	1,01
Con (2018)	9-15 cm	F	8,65	7,78	12,65	1,26
Con (2018)	9-15 cm	A	8,77	18,16	20,74	1,17
Sin (2018)	9-15 cm	A	8,87	11,5	15,08	1,35
Sin (2018)	9-15 cm	F	8,65	9,32	14,52	1,15
Sin (2018)	0-6 cm	A	8,38	13,55	21,71	1,3
Sin (2018)	0-6 cm	A	8,23	17,4	30,99	1,28
Sin (2018)	9-15 cm	A	8,72	12,14	17,3	1,31
Con (2018)	9-15 cm	A	8,87	14,25	15,91	1,23
Con (2018)	0-6 cm	A	8,38	20,92	39,44	1,23
Con (2018)	0-6 cm	A	8,51	19,7	30,15	1,24

Tabla 2: Resultados de 2020

Biochar	Profundidad	Suelo	pH	Fósforo (mg/kg)	Nitratos (mg/kg)	Daparent (g/cm ³)
Sin (2020)	0-6 cm	A	8,45	24,97	13,07	1,39
Sin (2020)	0-6 cm	A	8,38	20,00	21,56	1,22
Sin (2020)	0-6 cm	A	8,39	22,49	18,97	1,40
Sin (2020)	9-15 cm	A	8,67	10,97	7,33	1,55
Sin (2020)	9-15 cm	A	8,63	12,03	12,49	1,33
Sin (2020)	9-15 cm	A	8,69	18,50	4,72	1,55
Con (2020)	0-6 cm	A	8,52	15,40	10,20	1,34
Con (2020)	0-6 cm	A	8,53	24,61	10,09	1,31
Con (2020)	0-6 cm	A	8,57	22,57	5,72	1,43
Con (2020)	9-15 cm	A	8,69	13,98	3,07	1,34
Con (2020)	9-15 cm	A	8,59	20,71	5,34	1,37
Con (2020)	9-15 cm	A	8,64	16,73	4,33	1,47
Sin (2020)	0-6 cm	C	8,55	13,11	12,43	1,04
Sin (2020)	0-6 cm	C	8,59	21,43	11,45	0,92
Sin (2020)	0-6 cm	C	8,58	14,64	25,96	0,99
Sin (2020)	9-15 cm	C	8,75	9,10	10,78	1,20

Sin (2020)	9-15 cm	C	8,77	11,58	9,35	1,13
Sin (2020)	9-15 cm	C	8,68	16,94	12,87	1,23
Con (2020)	0-6 cm	C	8,55	17,41	21,96	0,99
Con (2020)	0-6 cm	C	8,63	13,97	13,02	1,02
Con (2020)	0-6 cm	C	8,54	22,58	16,13	0,98
Con (2020)	9-15 cm	C	8,69	8,05	10,41	1,22
Con (2020)	9-15 cm	C	8,73	6,71	9,18	1,49
Con (2020)	9-15 cm	C	8,68	6,14	13,23	1,37
Sin (2020)	0-6 cm	F	8,72	13,16	8,80	1,22
Sin (2020)	0-6 cm	F	8,65	12,64	9,47	1,19
Sin (2020)	0-6 cm	F	8,65	11,86	9,50	1,16
Sin (2020)	9-15 cm	F	8,82	8,56	6,81	1,37
Sin (2020)	9-15 cm	F	8,81	7,60	2,62	1,09
Sin (2020)	9-15 cm	F	8,77	9,95	6,93	1,48
Con (2020)	0-6 cm	F	8,75	11,42	9,47	1,24
Con (2020)	0-6 cm	F	8,76	12,64	4,32	1,23
Con (2020)	0-6 cm	F	8,63	12,81	12,11	1,10
Con (2020)	9-15 cm	F	8,73	9,16	9,83	1,23
Con (2020)	9-15 cm	F	8,78	6,64	8,33	1,22
Con (2020)	9-15 cm	F	8,71	9,69	10,66	1,30

Tabla 3: Resistencia de suelo (2020)

Suelo	Biochar	Cubierta veg	Sin golpe (cm)	3 golpes (cm)	7 golpes (cm)
F	Con	cub	13,7	17,2	20,2
F	Con	cub	15,7	18,5	20,7
F	Con	cub	16,3	22	25,5
F	Con	cub	19,2	23,2	25,2
F	Con	cub	15,7	19,7	22,2
F	Con	cub	18,2	24,7	27,7
F	Con	cub	16,2	22,8	26,7
F	Con	cub	18,2	22,2	25,2

F	Con	cub	17,2	23,2	25,7
F	Con	sin cub	10,2	15,3	17,8
F	Con	sin cub	11,2	15,2	18,4
F	Con	sin cub	12,2	16,2	20,2
F	Con	sin cub	9,8	14,7	18,2
F	Con	sin cub	10,7	13,7	15,7
F	Con	sin cub	9,7	13,7	16,7
F	Con	sin cub	11,4	15,2	17,2
F	Sin	sin cub	12,2	18,9	22,2
F	Sin	sin cub	10,2	15,2	17,7
F	Sin	sin cub	12,9	16,2	18
F	Sin	sin cub	8,2	13,2	15,7
F	Sin	sin cub	13,2	17,2	20,7
F	Sin	cub	15,2	19,7	24,2
F	Sin	cub	13,7	18,2	21,7
F	Sin	cub	15,2	19	22,4
F	Sin	cub	9,2	14,2	18,7
F	Sin	cub	15,2	21	25,7
F	Sin	cub	13,2	17,7	21,2
A	Con	cub	3,2	16,2	18,2
A	Con	cub	2,2	12,4	16,2
A	Con	cub	3,2	20,2	23,2
A	Con	cub	4,2	19,2	24,2
A	Con	cub	3,2	19,2	26,7
A	Con	sin cub	14,2	18,2	21,2
A	Con	sin cub	15,2	20,2	22,2
A	Con	sin cub	14,2	18,2	21,2
A	Con	sin cub	18,2	23,2	25,2
A	Con	sin cub	18,2	22,2	25,2
A	Con	sin cub	16,4	25,2	29,2

A	Con	sin cub	20,2	25,2	27,2
A	Con	sin cub	17,2	25,2	29,2
A	Con	sin cub	16,2	22,2	25,2
A	Sin	sin cub	14,2	18,2	20,2
A	Sin	sin cub	14,2	19	21,2
A	Sin	sin cub	14,7	18,2	20,7
A	Sin	sin cub	16,2	20,9	22,7
A	Sin	sin cub	13,5	19,7	18,2
A	Sin	sin cub	13,2	19,2	21,2
A	Sin	cub	4,2	15,2	18,3
A	Sin	cub	4,2	11,7	14,7
A	Sin	cub	4,2	14,7	18,2
A	Sin	cub	3,2	14,6	14,2
A	Sin	cub	2,7	13,2	16,2
C	Con	cub	3,7	18,2	26,2
C	Con	cub	5,2	17,2	24,2
C	Con	cub	4,2	15,7	23,2
C	Con	cub	5,2	17	23,2
C	Con	cub	4,2	12,2	15,2
C	Con	cub	5,2	16,2	21,2
C	Con	sin cub	11,2	21,2	24,7
C	Con	sin cub	11,2	16,2	20,2
C	Con	sin cub	13,2	18,2	29,2
C	Con	sin cub	13,2	21,2	25,7
C	Con	sin cub	10,7	16,2	21,2
C	Con	sin cub	14,7	22,2	29,7
C	Sin	sin cub	6,2	16,2	20,2
C	Sin	sin cub	16,2	22,2	27,2
C	Sin	sin cub	9,2	18,2	23,2
C	Sin	sin cub	4,2	16,2	22,2

C	Sin	sin cub	4,2	14,7	20,2
C	Sin	sin cub	8,2	18,2	22,7
C	Sin	cub	5,2	18,2	25,2
C	Sin	cub	4,2	17	20,2
C	Sin	cub	3,2	17	20,7
C	Sin	cub	3,7	17,2	20,2
C	Sin	cub	4,2	9,2	15,2
C	Sin	cub	6,2	12,2	15,2